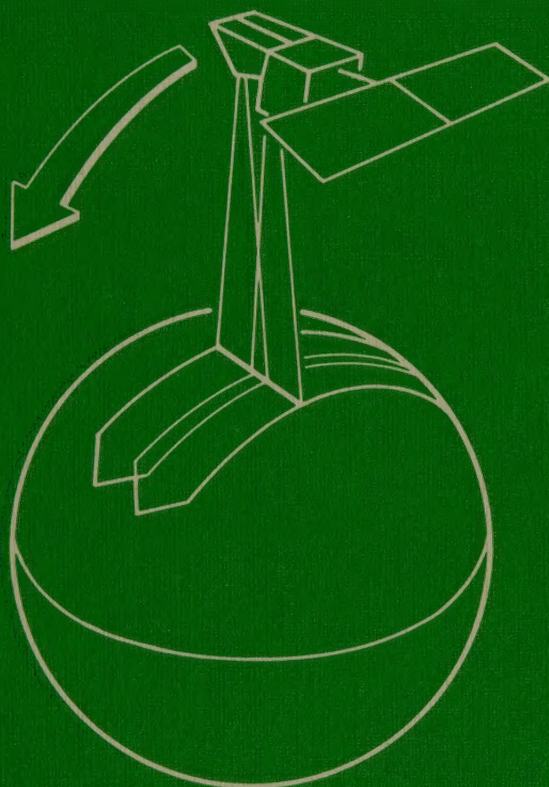


**KARL KRAUS**

---

# **FERNERKUNDUNG**

---



**BAND 2**

**Auswertung photographischer  
und digitaler Bilder**

Mit Beiträgen von J. Jansa und W. Schneider

---

 **ÜMMLER / BONN**



KARL KRAUS

**FERNERKUNDUNG**

BAND 2

Auswertung photographischer und digitaler Bilder

Mit Beiträgen von J. Jansa und W. Schneider







---

# FERNERKUNDUNG

---

## BAND 2

### Auswertung photographischer und digitaler Bilder


von  
Prof. Dr.-Ing. Karl KRAUS

Mit Beiträgen von  
Dr.-techn. Josef Jansa und Dr.-techn. Werner Schneider

Institut für Photogrammetrie  
und Fernerkundung  
der Technischen Universität Wien

Mit 153 Abbildungen  
und 13 Tabellen.  
Dümmlerbuch 7867

---

FERD.  ÜMMLER<sup>s</sup> VERLAG · BONN

---

**Beachten Sie bitte die Firmen- und Verlagsanzeigen am Schluß des Bandes.**

---

ISBN 3-427-78671-4

Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen bedarf deshalb der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verlanges.

© 1990 Ferd. Dümmers Verlag, Kaiserstraße 31-37 (Dümmelerhaus), 5300 Bonn 1

Printed in Germany by Hans Richarz Publikations-Service, 5205 St. Augustin 1

## V O R W O R T

Eineinhalb Jahre nach dem Erscheinen des Bandes 1, der die physikalischen Grundlagen und die Aufnahmetechniken der Fernerkundung enthält, kommt der Band 2 heraus, der die Auswertung photographischer und digitaler Bilder behandelt. Der Band 1 wurde von den Lesern inzwischen sehr gut aufgenommen: Nach eineinhalb Jahren ist bereits die Hälfte der 1. Auflage verkauft. Auch die bisher erschienenen Rezensionen über den Band 1 sind sehr ermunternd: Man begrüßt das erste deutschsprachige Lehrbuch für die Fernerkundung und stellt besonders die ausgewogene Kombination von Theorie und Anwendungen sowie die vielen Zahlenbeispiele und Aufgaben positiv heraus.

Die Kapitel- und Seitennumerierung des Bandes 1 wird im Band 2 unmittelbar fortgesetzt. Der Band 2 beginnt mit dem 5. Abschnitt "Auswertung photographischer Bilder". Dieser Abschnitt enthält eine "Mini-"Photogrammetrie und die Anleitungen zur visuellen Interpretation photographischer Bilder. Der 6. und wesentlich umfangreichere Abschnitt befaßt sich mit der "Digitalen Bildverarbeitung". Der Bogen spannt sich von der Farbtheorie über die geometrische und radiometrische Rektifizierung bis zur Filterung im Orts- und im Frequenzbereich sowie bis zur multispektralen Klassifizierung und Mustererkennung.

Der Band 2 ist zwar eine unmittelbare Fortsetzung des Bandes 1; jene Leser, die nur an der Bildauswertung interessiert sind, können sich aber auch mit dem Band 2 allein begnügen. Um die Zusammenschau der beiden Bände zu erleichtern, sind im Band 2 die Inhaltsverzeichnisse für beide Bände abgedruckt. Das Sachregister am Ende des Bandes 2 enthält außerdem die Schlagworte sowohl des Bandes 1 als auch des Bandes 2. Im Band 2 gibt es - wie im Band 1 - einige Hinweise auf die ebenfalls im Dümmler Verlag erschienenen beiden Bücher "Photogrammetrie". In den "Hinweisen für den Leser" auf der übernächsten Seite wird darauf näher eingegangen.

Der Koautor des Bandes 1, Herr Dipl.-Ing. Dr.techn. W. Schneider (Institut für Vermessungswesen und Fernerkundung der Universität für Bodenkultur) hat im Band 2 den Abschnitt 6.5 selbständig bearbeitet. Ein Mitarbeiter des Institutes für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien, Herr Dipl.-Ing. Dr.techn. J. Jansa, hat die Abschnitte 6.1.1, 6.3, 6.6.3, 6.9, 6.10 und 6.11 selbständig verfaßt. Trotz der unterschiedlichen Herkunft der einzelnen Beiträge hat sich das Autorenteam das Ziel gesetzt, daraus ein für den Leser homogenes Gesamtwerk zu gestalten. Mitarbeiter des Institutes für



Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien haben ebenfalls viele Anregungen eingebracht sowie einige Zahlen- und Graphikbeispiele bearbeitet; hier sind besonders zu nennen: Dr.techn. H. Kager, Dipl.-Ing. R. Kalliany, und Prof. Dr. P. Waldhäusl. Von den Studierenden, die Beispiele bearbeitet und Zeichnungen angefertigt haben, sind vor allem Frau E. Papandreou und die Herren J. Kanonier, G. Senftner und H. Titz zu erwähnen. Frau Emersberger hat auf der Textverarbeitung wieder viel Akrobatisches geleistet. Ich danke allen für das große Engagement.

Wien, im Frühjahr 1990

Karl Kraus

### Hinweise für den Leser:

Die Hauptabschnitte und die hierarchisch gegliederten Unterabschnitte sind mit einer Dezimalklassifikation numeriert. Die Formeln sind mit den ersten beiden Ziffern der Dezimalklassifikation versehen und innerhalb des jeweiligen Abschnittes fortlaufend numeriert. Die Formel (6.7-6) ist z.B. die 6. Formel im Abschnitt 6.7.... Ein Hinweis auf eine Formel ist in Klammern angegeben. Dagegen sind die Hinweise auf Bilder, Tabellen und Aufgaben nicht in Klammern gesetzt, aber nach dem gleichen Prinzip numeriert wie die Formeln. Die Aufgabe 6.6-4 ist z.B. die 4. Aufgabe im Abschnitt 6.6.... Bilder und Tabellen sind in die gleiche fortlaufende Numerierung eingebunden, d.h. Bild 5.3-9 ist im Abschnitt 5.3... an 9. Position, wobei die 8 Positionen vorher mit Bildern und/oder Tabellen belegt sind.

Hinweise auf Abschnitte, Formeln, Bilder und Tabellen, deren erste Ziffer kleiner als 5. ist, beziehen sich auf Band 1 Fernerkundung. Hinweise auf Abschnitte, Formeln, Bilder und Tabellen, die vor der Dezimalklassifikationszahl einen Buchstaben enthalten, beziehen sich auf die folgenden - ebenfalls im Dümmler Verlag erschienenen - Bücher:

K. Kraus mit Beiträgen von P. Waldhäusl: Photogrammetrie. Band 1: Grundlagen und Standardverfahren. 2. Auflage, 1986. 3. Auflage, 1990.

K. Kraus: Photogrammetrie. Band 2: Theorie und Praxis der Auswertesysteme. 1. Auflage, 1984. 2. Auflage, 1987.

Dabei gehört der Buchstabe A zum Band 1 und die übrigen Buchstaben gehören zum Band 2. Ein Hinweis A 3.3.4 bedeutet demnach den Abschnitt 3.3.4 im Band 1 Photogrammetrie.

Der Inhalt des vorliegenden Bandes 2 wurde - wie bereits der des Bandes 1 - zur Orientierung der Leser wie folgt gekennzeichnet:

- Links markierte Passagen sind für die Leser interessant, die sich einen Überblick über die Fernerkundung verschaffen wollen.
- Rechts markierte Passagen sind für die Leser interessant, die die erwähnten Photogrammetrie-Bücher kennen und sich in die Fernerkundung vertiefen wollen.
- Die Passagen ohne Markierung sind für beide Gruppen von Lesern vorgesehen.

Das Lehr- und Übungsbuch in seiner Gesamtheit ist demnach für Leser konzipiert, die sich in die Fernerkundung ein über eine Einführung hinausgehendes Wissen und in der Photogrammetrie einen Überblick aneignen wollen.

Größen im Landeskoordinatensystem (z.B. die X-, Y- und Z-Koordinaten) sind in der Regel in Großbuchstaben geschrieben. Die geometrischen Größen im Bild (z.B. die x- und y-Koordinaten) sind dagegen in Kleinbuchstaben angegeben. Die Symbole für Vektoren und Matrizen sind unterstrichen.





<u>INHALTSVERZEICHNIS VON BAND 2:</u>	Seite
<u>5. AUSWERTUNG PHOTOGRAPHISCHER BILDER</u>	307
5.1 Geometrische Auswertung von Meßbildern	307
5.1.1 Das Meßbild als Karte	308
5.1.2 Optische und photographische Entzerrung mittels zentralperspektivischer Umbildung	311
5.1.3 Vereinfachte Zweibildauswertung	315
5.1.4 Strenge Zweibildauswertung	321
5.1.4.1 Mathematische Vorbemerkungen	322
5.1.4.2 Analytische Auswertegeräte	328
5.1.4.3 Analogauswertegeräte	334
5.1.4.4 Topographische Informationssysteme	335
5.1.5 Orthophotos und Stereoorthophotos	347
5.1.5.1 Orthophotos und Stereoorthophotos aus Luftaufnahmen	348
5.1.5.2 Orthophotos und Stereoorthophotos aus Satellitenaufnahmen	350
5.1.5.3 Praxisorientierte Hinweise zur Orthophoto- und Stereoorthophotographie	359
5.1.6 Phototriangulation	359
5.2 Geometrische Auswertung von Amateurbildern	361
5.3 Visuelle Interpretation photographischer Bilder	363
5.3.1 Abgrenzung zu den Methoden der digitalen Bildauswertung	363
5.3.2 Vorbereitungsarbeiten für eine visuelle Interpretation	364
5.3.3 Interpretationsschlüssel und Interpretationstraining	367
5.3.4 Flächenkartierung	372
5.3.5 Einzelobjektinterpretation	372
5.3.6 Stichprobenverfahren und Rastermethode	373
5.3.7 Analyse der Interpretationsergebnisse	374
<u>6. DIGITALE BILDVERARBEITUNG</u>	376
6.1 Farbtheorie und Definitionen	376
6.1.1 Bemerkungen zur Farbtheorie	376
6.1.1.1 Der Farbwürfel	376
6.1.1.2 Das Farbdreieck	379
6.1.1.3 Das IHS-System	397
6.1.2 Definition eines digitalen Bildes	405
6.2 Entstehung digitaler Bilder	407
6.3 Wiedergabe digitaler Bilder	412
6.3.1 Ausgabe auf einem Drucker	412
6.3.2 Darstellung auf einem Farbbildschirm	415

6.3.3 Ausgabe auf Film	417
6.3.4 Drucktechnische Wiedergabe	419
6.4 Geometrische Rektifizierung	422
6.4.1 Rektifizierung der aus Photographien entstandenen digitalen Bilder	422
6.4.2 Rektifizierung der mit Abtastern in Flugzeugen aufgenommenen Bilder	428
6.4.2.1 Panoramakorrektur und Zeilenschiefe	428
6.4.2.2 Nichtparametrische Rektifizierung	431
6.4.2.3 Ursachen der Verzerrungen in den Scanner-aufnahmen	439
6.4.2.4 Parametrische Rektifizierung	446
6.4.3 Rektifizierung der mit Abtastern in Satelliten aufgenommenen Bilder	458
6.4.4 Rektifizierung von RADAR-Aufnahmen	460
6.5 Radiometrische Rektifizierung optischer Bilddaten	464
6.5.1 Korrektur atmosphärischer Einflüsse	465
6.5.2 Korrektur von Blickrichtungseffekten	469
6.5.3 Wirkung der Differenz- und Verhältnisbildung von Bildkanälen	478
6.5.4 Berücksichtigung von Detektor-Nichtlinearitäten	480
6.5.5 Radiometrische Rektifizierung im Falle breiter spektraler Empfindlichkeitsbereiche der Detektoren	482
6.6 Einfache Grauwertoperationen	483
6.6.1 Kontrast- und Helligkeitsveränderung	483
6.6.2 Äquidensiten	492
6.6.3 Farbkodierung	494
6.6.4 Differenzieren von Bildern	501
6.7 Filterung	507
6.7.1 Filterung im Ortsbereich	507
6.7.2 Spektralanalyse	513
6.7.3 Filterung im Frequenzbereich	520
6.7.4 Zusammenhang zwischen der Filterung im Orts- und der im Frequenzbereich	526
6.7.5 Entwurf eines Filters	530
6.8 Multispektrale Klassifizierung	533
6.8.1 Mehrdimensionaler Merkmalsraum	534
6.8.2 Klassifizierung mittels kürzester Entfernung	536
6.8.3 Klassifizierung mittels Quader	540
6.8.4 Statistische Analyse von Multispektralbildern	543
6.8.4.1 Statistische Beschreibung einer Objektklasse	543
6.8.4.2 Statistische Beschreibung für alle Objektklassen	551
6.8.4.3 Hauptkomponententransformation	552
6.8.5 Klassifizierung mittels maximaler Mutmaßlichkeit	556

6.8.6 Modifizierte und/oder zusätzliche Kanäle für die Klassifizierung	560
6.8.7 Hybride Klassifizierungsansätze	562
6.8.8 Nachbehandlung des Klassifizierungsergebnisses	562
6.8.9 Anwendungs- und EDV-orientierte Hinweise	562
6.9 Bemerkungen zur Mustererkennung	564
6.9.1 Bildsegmentierung	566
6.9.2 Hough-Transformation	568
6.9.3 Bildpyramiden	571
6.9.4 Expertensysteme	575
6.9.5 Mustererkennung mit Hilfe eines neuronalen Netzwerkes	576
6.10 Korrelation	578
6.10.1 Verschiedene Korrelationsfunktionen	578
6.10.2 Subpixeleinpassung durch Ausgleichung nach kleinsten Quadraten	581
6.10.3 Integration von Bildzuordnung und Objektrekonstruktion innerhalb der digitalen Photogrammetrie	585
6.11 Digitale Bildverarbeitungsanlagen	586
6.11.1 Hardware- und Software-Konfigurationen	586
6.11.2 Datenformate	592
6.11.2.1 Speicherung für sequentiellen Zugriff	595
6.11.2.2 Speicherung für Direkt-Zugriff	598
6.11.2.3 Run-Length-Kodierung	598
6.11.2.4 Quadrees	599
6.11.2.5 Kettencode	601
6.11.3 Fernerkundungsdaten für Geo-Informationssysteme	602
Anhang 6.1-1: Normspektralwerte $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$	603
Anhang 6.1-2: Formeln für die Umrechnung vom RGB-System in IHS-Systeme	604
Anhang 6.4-1: Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate	605
Anhang 6.7-1: Fouriertransformation und inverse Fouriertransformation in der komplexen Zahlenebene	608
LITERATURHINWEISE	610
SACHREGISTER von Band 1 und 2	
Anzeigen von Geräteherstellern	



INHALTSVERZEICHNIS VON BAND 1:

Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechnik  
von Karl Kraus und Werner Schneider

	Seite
<u>1. EINLEITUNG</u>	7
1.1 Definitionen	7
1.2 Anwendungsmöglichkeiten	8
<u>2. EINIGE PHYSIKALISCHE VORBEMERKUNGEN</u>	10
2.1 Überblick über Fernerkundungssysteme	10
2.2 Elektromagnetische Strahlung	12
2.3 Grundlagen der Radiometrie	18
2.4 Ausbreitung und Absorption elektromagnetischer Strahlung in Materie	30
2.5 Reflexion elektromagnetischer Strahlung an der Geländeoberfläche	36
2.6 Thermische Emission von Strahlung	52
2.7 Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung und Atmosphäre	60
<u>3. AUFNAHMESYSTEME (SENSOREN)</u>	74
3.1 Photographische Systeme	74
3.1.1 Meßkameras	74
3.1.1.1 Gerätetechnisches und Operationelles	74
3.1.1.2 Abbildungsschärfe	81
3.1.1.2.1 Tiefenschärfe	81
3.1.1.2.2 Linsenfehler	82
3.1.1.2.2 Beugungsunschärfe	82
3.1.1.2.4 Geometrisches Auflösungsvermögen	82
3.1.1.2.5 Bewegungsunschärfe	83
3.1.1.3 Die Kamera als Strahlungsmesser	86
3.1.1.4 Photographische Belange	94
3.1.1.4.1 Farben und Filter	94
3.1.1.4.2 Schwarzweiß-Photographie	99
3.1.1.4.3 Farbphotographie	104
3.1.1.4.4 Farbinfrarotphotographie	106
3.1.1.5 Spektrale Empfindlichkeit verschiedener Filmtypen und Zuordnung der entsprechenden Objektinformation	108
3.1.1.6 Charakteristika einiger Filme	112
3.1.1.7 Photographische Folgeprodukte	114
3.1.2 Multispektralkamera	116

3.2	Abtastsysteme (scanner)	119
3.2.1	Mechanische Abtaster (Rotationsabtaster)	119
3.2.1.1	Gerätetechnisches und Operationelles	119
3.2.1.2	Geometrisches Auflösungsvermögen und Kontrastübertragung	125
3.2.1.3	Charakterisierung von Detektorsystemen	139
3.2.1.4	Der Abtaster als Strahlungsmesser	146
3.2.1.5	Das Signal/Rauschverhältnis in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern	156
3.2.1.6	Die Thermalstrahlung und die Zuordnung der entsprechenden Objektinformationen	160
3.2.1.7	Gegenüberstellung photographischer Systeme und Abtaster	164
3.2.2	Digitale Zeilenkameras (opto-elektronische Abtaster)	165
3.3	Nichtphotographische Flächensensoren	172
3.4	Mikrowellensysteme	173
3.4.1	Einleitung	173
3.4.2	Mikrowellen-Radiometer	177
3.4.3	Aktive Mikrowellensysteme (RADAR)	187
3.4.3.1	Prinzip des Seitensicht-RADARS	187
3.4.3.2	Seitensicht-RADAR mit synthetischer Apertur	190
3.4.3.3	Geometrische Eigenschaften von RADAR-Bildern	195
3.4.3.4	Radiometrische Eigenschaften von RADAR-Bildern	197
3.4.3.5	Anwendungen von RADAR-Bilddaten	204
3.5	Terrestrische Erhebung von radiometrischen Referenzdaten zu optischen Fernerkundungsaufnahmen	206
3.5.1	Spektralradiometer	206
3.5.2	Meßanordnung	212
3.5.3	Ermittlung der optischen Dicke der Atmosphäre	215
3.5.4	Ermittlung des gerichteten Reflexionsgrades von Oberflächen	218
4.	<u>DAS ANGEBOT UND DIE BESCHAFFUNG VON AUFNAHMEN</u>	220
4.1	Aufnahmen mit Flugzeugen	220
4.1.1	Photographische Aufnahmen	220
4.1.1.1	Flugplanung	220
4.1.1.2	Bildflugzeuge	226
4.1.1.3	Luftbildarchive	227
4.1.2	Aufnahmen mit Abtastern	227
4.1.3	Mikrowellen-Aufnahmen	228
4.2	Aufnahmen mit Satelliten	229
4.2.1	Bahnparameter	229
4.2.2	LANDSAT-1, 2 und 3	240
4.2.3	LANDSAT-4 und 5	247

4.2.4 SEASAT und Shuttle Imaging RADAR (SIR)	254
4.2.5 Heat Capacity Mapping Mission (HCMM)	256
4.2.6 Satelliten für die Meteorologie	256
4.2.7 MOMS mit Space Shuttle	259
4.2.8 Meßkameras im Space Shuttle	260
4.2.9 SPOT	263
4.2.10 Weitere Satelliten	272
4.2.11 Einige Zukunftsprogramme der Fernerkundung aus dem Weltraum	273
Anhang 2.3-1: Integration über die Richtungen des Halbraumes	282
Anhang 2.3-2: Photometrische Einheiten	283
Anhang 2.4-1: Ableitung des Lambert-Beer-Gesetzes	285
Anhang 2.7-1: Ableitung der Beziehung $V = 3.93/\beta_{\text{ext}}$	286
LITERATURHINWEISE	288

SACHREGISTER von Band 1



## 5. AUSWERTUNG PHOTOGRAPHISCHER BILDER

Wir beginnen mit der geometrischen Auswertung von photographischen Meßbildern und streifen auch kurz die geometrische Auswertung von Amateurbildern. Die geometrische Auswertung photographischer Bilder ist die Domäne der Photogrammetrie. Im Anschluß an einen Überblick über photogrammetrische Auswerteverfahren wird die thematische Auswertung photographischer Bilder besprochen. Sowohl die geometrische als auch die thematische Auswertung digitaler Bilder wird innerhalb des 6. Kapitels "Digitale Bildverarbeitung" behandelt.

Am Anfang des gegenwärtigen Abschnittes soll auf die Bedeutung der geometrischen Auswerteverfahren auch für die thematischen Interpretationen hingewiesen werden. In vielen Fällen läuft im Hintergrund einer thematischen Auswertung auch eine geometrische Auswertung ab. Die Ergebnisse der thematischen Interpretation werden nämlich in der Regel quantifiziert bzw. maßstäblich dargestellt bzw. mit den Rahmenkarten eines Landes oder dem Landeskoodinatenystem in Beziehung gesetzt.

Darüber hinaus kommt den geometrischen Parametern auch innerhalb des thematischen Interpretationsvorganges, sei er visuell oder mittels EDV, eine große Bedeutung zu. Z.B. gibt es bestimmte Vegetationsarten nur in gewissen Höhenlagen oder innerhalb gewisser Neigungszonen. Auch die Exposition der Geländeausschnitte, also ihre Stellung gegenüber der Sonneneinstrahlung, spielt bei vielen thematischen Interpretationsaufgaben eine wesentliche Rolle.

Schließlich benötigt man die Geländeform in vielen theoretischen Modellen. Zum Beispiel muß die Strahlungsmessung mittels Fernerkundung von einem solchen theoretischen Modell begleitet werden. Auch für die theoretische Beschreibung des großräumigen Schadstofftransportes ist die Geländeform von Wichtigkeit.

### 5.1 Geometrische Auswertung von Meßbildern

Geometrische Auswertungen sollten immer mit Meßbildern durchgeführt werden. Amateuraufnahmen, auf die im Abschnitt 5.2 eingegangen wird, bieten für geometrische Auswertungen wesentlich ungünstigere Bedingungen. Auch die mit Abtastern hergestellten Bilder sind zur Beantwortung geometrischer Fragestellungen sehr schlecht geeignet. Diese Aussage bezieht sich allerdings auf Scanneraufnahmen, die mit Flugzeugen erfolgen werden, und nicht auf

Scanneraufnahmen von Satelliten. Letztere bieten für geometrische Problemstellungen durchaus günstige Bedingungen und sind in vielen Fällen auch die einzige zur Verfügung stehende Unterlage.

### 5.1.1 Das Meßbild als Karte

Die geometrische Auswertung ist am einfachsten, wenn man das Luft- bzw. Weltraumbild direkt als Karte verwenden kann. Eine solche Vorgehensweise setzt voraus, daß man für das Meßbild eine Maßstabszahl, die für das Gesamtformat gültig ist, angeben kann. Es gibt - wie im Bild 3.1-6 veranschaulicht - tatsächlich eine Aufnahmedisposition, die photographische Bilder mit einem einheitlichen Maßstab liefert: Einerseits muß das Gelände eben sein und andererseits muß die Aufnahmerichtung orthogonal zur Geländeebene stehen. Der Bildmaßstab  $1:m_b$ , der in diesem Fall dem Kartenmaßstab  $1:m_k$  entspricht, ist dann festgelegt durch (Gleichung (3.1-1)):

$$\boxed{\frac{1}{m_b} = \frac{1}{m_k} = \frac{c}{Z_g}} \quad (5.1-1)$$

Die Kammerkonstante  $c$  ist bei Meßbildern bekannt. Die Flughöhe über Grund  $Z_g$  erhält man aus der absoluten Flughöhe  $Z_0$ , die der Grobhöhenmesser (siehe Bild 3.1-5) liefert, und der Geländehöhe  $Z$ . Den Maßstab kann man aber auch mit einem Streckenvergleich bestimmen.

Zahlenbeispiel: Der Grobhöhenmesser zeigt eine Höhe von 2300 m an, die sich auf Meeresniveau bezieht; das Gelände liegt in einer Höhe von 500 m. Die Kammerkonstante beträgt 210 mm. Damit ergibt sich ein Bild- bzw. Kartenmaßstab von  $1:m_k = 0.210/(2300-500) = 1:8600$ .

Aufgabe 5.1-1: Man überlege sich den Maßstabsfehler infolge der Unsicherheit des Grobhöhenmessers von  $\pm 50$  m.

Welche Fehler treten bei der direkten Verwendung der Meßbilder als Karten auf, wenn die oben erwähnten Voraussetzungen nicht erfüllt sind? Zuerst wird auf den Fehler eingegangen, den Objekte, z.B. Gebäude oder Geländekleinformen, außerhalb einer angenommenen Geländeebene verursachen. Im Bild 5.1-1 ist das Meßbild, in dem die Bildversetzungen auftreten, in Positivstellung<sup>1</sup> angegeben. Die Bildversetzungen  $\Delta r$  verlaufen vom bzw. zum

<sup>1</sup> Sie unterscheidet sich von der bei der Aufnahme (Bild 3.1-1) gegebenen Negativstellung dadurch, daß vom aufgenommenen Bild eine Kontaktkopie - tatsächlich oder gedanklich - hergestellt und diese Kontaktkopie um die zweifache Kammerkonstante in Aufnahmerichtung verschoben sowie um  $180^\circ$  um die Aufnahmerichtung gedreht wird.

Bildhauptpunkt H in radialer Richtung und betragen:

$$\boxed{\Delta r = \Delta R \frac{c}{z} = \Delta Z \frac{r}{z} = \Delta Z \frac{r}{c \cdot m_b}} \quad (5.1-2)$$

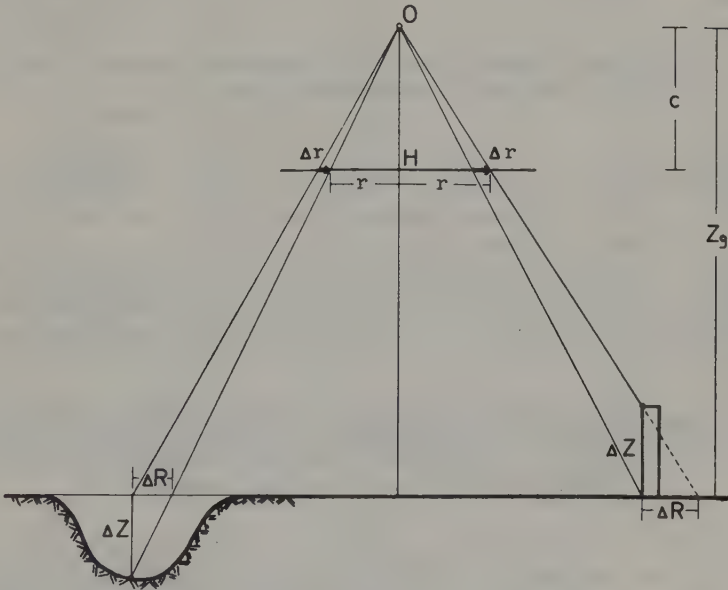


Bild 5.1-1: Radiale Bildversetzung  $\Delta r$  von Punkten außerhalb einer angenommenen Geländeebene bei exakten Senkrechtaufnahmen

Für einige gängige Bildmaßstäbe und verschiedene Kamerateypen sind in Abhängigkeit vom Abstand  $\Delta Z$  in der Tab. 5.1-2 die maximalen radialen Bildversetzungen  $\Delta r$ , die in den Bildecken auftreten, eingetragen. Bei Satellitenaufnahmen, die für Normalwinkelkameras auch in der Tab. 5.1-2 mit einem typischen Bildmaßstab aufgenommen wurden, ist die Abschätzung mittels der Beziehung (5.1-2) eigentlich nicht erlaubt. Bei so kleinmaßstäbigen Aufnahmen kann nämlich die Erdkrümmung nicht mehr vernachlässigt werden (siehe Abschnitt 5.1.5.2).

$\Delta Z$ $m_b$	1 m	5 m	25 m	100 m	250 m	750 m
Normalwinkel (23 x 23 cm , c = 30 cm)						
5000	0.1	0.5	2.7	10.8	27.0	81.1 mm
10000	0.05	0.3	1.4	5.4	13.5	40.6 mm
25000	0.02	0.1	0.5	2.2	5.4	16.2 mm
750000	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.5 mm
Weitwinkel (23 x 23 cm , c = 15 cm)						
5000	0.2	1.1	5.4	21.6	54.0	162.2 mm
10000	0.1	0.5	2.7	10.8	27.0	81.1 mm
25000	0.04	0.2	1.1	4.4	10.8	32.4 mm
50000	0.02	0.1	0.5	2.2	5.4	16.2 mm
Überweitwinkel (23 x 23 cm , c = 9 cm)						
5000	0.4	1.8	9.0	36.1	90.1	270.3 mm
10000	0.2	0.9	4.5	18.1	45.0	135.1 mm
25000	0.1	0.4	1.8	7.2	18.0	54.1 mm
50000	0.03	0.2	0.9	3.6	9.0	27.0 mm

Tab. 5.1-2: Radiale Bildversetzung  $\Delta r$  (in mm) in den Bildecken ( $r = 162$  mm) in Abhängigkeit von der Bildmaßstabszahl  $m_b$ , vom Abstand  $\Delta Z$  der Punkte außerhalb der angenommenen Objektebene und vom Kamertyp.

Nun soll auf die Verletzung der zweiten Voraussetzung, d.h auf die nicht-orthogonale Aufnahmerichtung, eingegangen werden. In der Praxis können wir uns auf Neigungen  $\nu < 5$  gon beschränken, da mit Flugzeugen eine Horizontierung innerhalb dieser Toleranz eingehalten werden kann. Die (kleinen) Neigungen  $d\nu$  der genäherten Senkrechtaufnahmen verursachen im Meßbild Versetzungen  $ds$ , die nach der Formel (5.1-3) abgeschätzt werden können:

$$ds = \frac{r^2}{c} d\nu$$

(5.1-3)<sup>1</sup>

Dabei ist  $c$  die Kammerkonstante und  $r$  die Entfernung des Bildpunktes vom Bildhauptpunkt H. In der Tab. 5.1-3 sind für drei Kamertypen die Versetzungen  $ds$  in Abhängigkeit von den Neigungen  $d\nu$  eingetragen.

<sup>1</sup> Die Ableitung ergibt sich aus den Formeln A(4-8)), wenn man den Übergang vom Modell ins Bild vornimmt und eine Neigung  $d\nu$  in Richtung einer Bild-diagonalen annimmt.



$\begin{array}{c} dv \\ \swarrow \\ c \end{array}$	1 gon	2 gon	5 gon	10 gon
30 cm	1.4	2.7	6.9	13.8 mm
15 cm	2.8	5.5	13.8	27.5 mm
9 cm	4.6	9.2	22.9	45.9 mm

Tab. 5.1-3: Bildversetzungen  $ds$  (in mm) in den Bildecken ( $r = 162$  mm) in Abhängigkeit von den Bildneigungen  $dv$  und vom Kameratyp

Die Bildversetzungen infolge Bildneigungen können mit den Entzerrungsverfahren des folgenden Abschnittes eliminiert werden.

Aufgabe 5.1-2: Ein Meßbild, das mit einer Reihenmeßkamera RMK 15/23 (3.1.1.1) in einer Flughöhe von 3000 m über Grund aufgenommen werden soll, soll direkt als Karte verwendet werden. Man berechne die Fehler dieser "Karte", wenn Geländehöhenunterschiede von  $\pm 25$  m und Bildneigungen von maximal 2 gon zu erwarten sind.

Aufgabe 5.1-3: In dem in der Aufgabe 5.1-2 spezifizierten Luftbild ist 4.5 cm vom Bildhauptpunkt entfernt ein 18 m hohes Gebäude abgebildet. Wie groß ist die Versetzung des Dachfirstes gegenüber dem entsprechenden Grundrißpunkt ?

#### 5.1.2 Optische und photographische Entzerrung mittels zentralperspektivischer Umbildung

Voraussetzung für eine zentralperspektivische Entzerrung, die kurz perspektive Entzerrung genannt wird, sind Paßpunkte, also Punkte, die im Bild identifiziert werden können und deren Koordinaten man in einem XY-Koordinatensystem kennt. Das XY-Koordinatensystem ist in der Regel das Landeskoordinatensystem; es kann aber auch ein lokales Koordinatensystem sein. Die XY-Koordinaten der Paßpunkte erhält man

- durch geodätische Messung im Gelände oder
- mittels Phototriangulation (5.1.6) oder
- aus vorhandenen Karten.

Für die perspektive Entzerrung eines Meßbildes benötigt man drei Paßpunkte und für die Entzerrung eines Amateurbildes vier Paßpunkte (A 2.4 und A 6.2).

Die photographische Entzerrung läuft darauf hinaus, daß man das ursprüngliche Bild in einen "Projektionsapparat" einlegt und nochmals photographiert. Das umphotographierte Bild entspricht einer exakten Senkrechtaufnahme, die bekanntlich bei ebenem Gelände maßstabsgetreu ist. Ein solches

geometrisch richtiges Bild nennen wir Orthophoto.

Der Vorgang der photographischen Entzerrung ist im Bild 5.1-4 skizziert. Das ursprüngliche Bild wird oben eingelegt und von rückwärts beleuchtet; auf dem Tisch entsteht - in der Regel auf Photopapier - das entzerrte Bild.

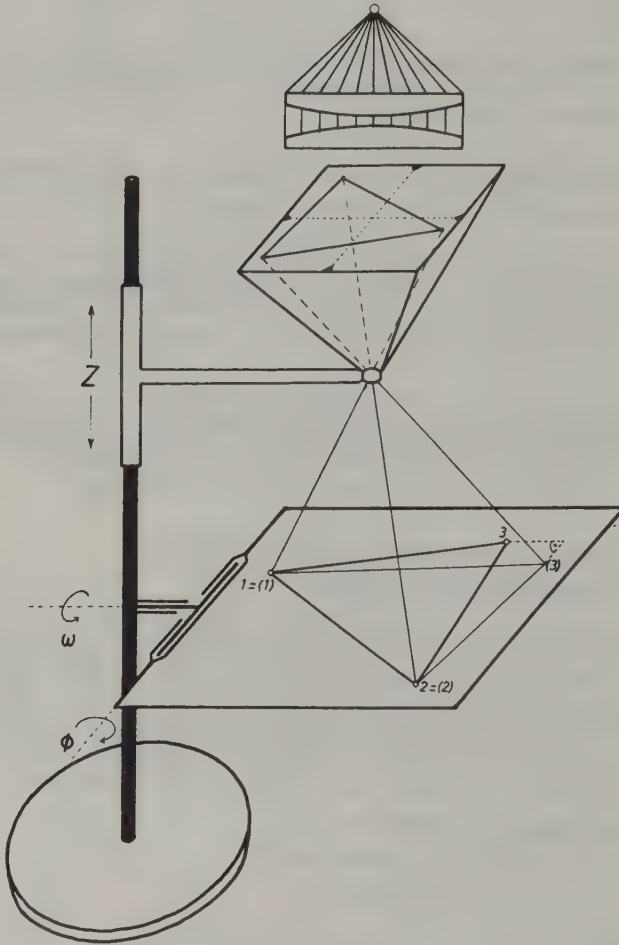


Bild 5.1-4: Gerät für die photographische Entzerrung

Vor dem Umphotographieren sind im Entzerrungsgerät Einstellungen vorzunehmen. Zu diesem Zweck werden die drei Paßpunkte mit ihren XY-Koordinaten auf einem Zeichenblatt kartiert, das für die Einpassung auf den Projektionstisch gelegt wird. Durch Verschieben und Drehen des Zeichenblattes und mittels einer Z-Verschiebung kann an den Paßpunkten 1 und 2 Identität erreicht werden. Die dann noch vorhandene Abweichung im Paßpunkt 3 kann durch

Neigungen  $\omega$  und  $\phi$  des Tisches behoben werden. Weitere Einzelheiten einer solchen perspektiven Entzerrung entnehme man dem Abschnitt A 6.2.

Bei der optischen Entzerrung wird nach dem Einpaßvorgang - falls ein Gerät vom Typ des Bildes 5.1-4 benutzt wird - das auf den Tisch projizierte Bild nachgezeichnet. Die optische Entzerrung wird vor allem benutzt, wenn bereits Karten - am besten topographische Karten - vorliegen. Kartenpunkte bzw. Kartenelemente können nämlich als Paßpunkte benutzt werden. Die Vielzahl der Kartenpunkte erlaubt die Zerlegung des gesamten Bildes in mehrere Facetten, wobei die einzelnen Facetten so gewählt werden, daß sie ebene Geländeflächen repräsentieren. Auf diese Weise können auch Bilder unebenen Geländes ausgewertet werden.

Für die Facettenmethode gibt es sehr komfortable Geräte (z.B. das im Bild 5.1-5 abgebildete Gerät). Mit diesem Gerät kann innerhalb einer Facette das Bild mit optischen Hilfsmitteln maßstäblich verändert, gedreht und gestaucht werden bis eine Übereinstimmung mit dem Kartenausschnitt erreicht

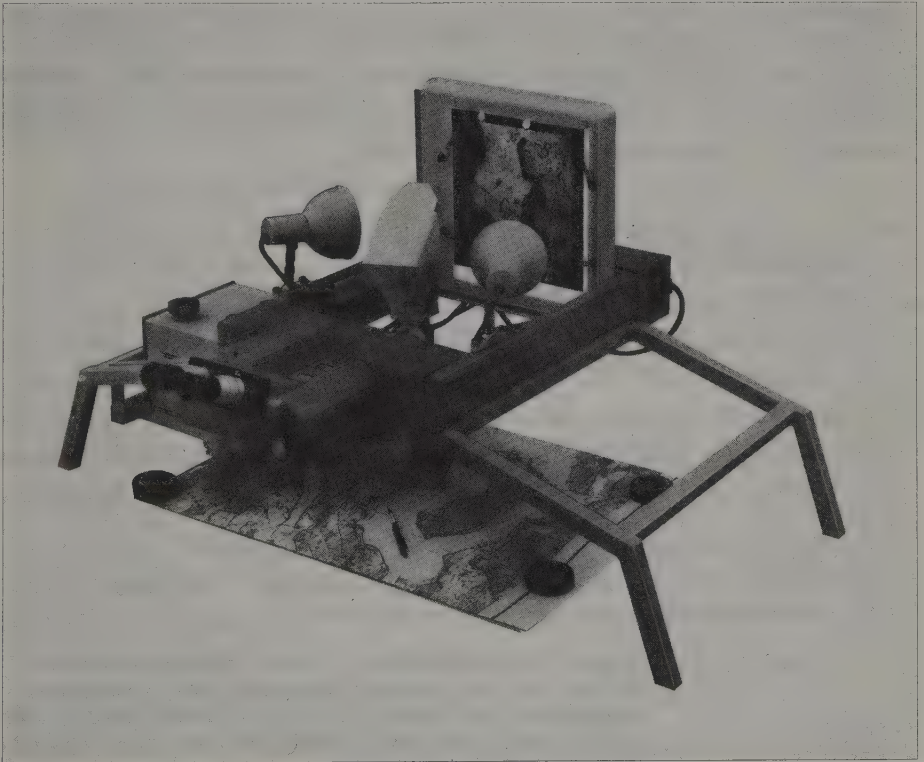


Bild 5.1-5: Zoomtransferskop ZT4 der Fa. Bausch & Lomb

ist. Obwohl es diese komfortablen Geräte für die optische Entzerrung gibt, darf der Aufwand der Facettenmethode nicht unterschätzt werden. Er ist im Vergleich zu den strengen Verfahren des Abschnittes 5.1.4 und 5.1.5 nur dann vertretbar, wenn das Gelände nicht sehr kupiert ist und/oder wenn verhältnismäßig wenig Inhalt dem Bild entnommen werden soll.

Am Ende dieses Abschnittes soll darauf hingewiesen werden, daß mit Hilfe der perspektiven Entzerrung nur die Bildverzerrungen infolge der Bildneigungen behoben werden können. Die radialen Bildversetzungen  $\Delta r$  infolge von Höhendifferenzen  $\Delta Z$ , die gegenüber der angenommenen Bezugsebene auftreten, sind auch in den umphotographierten bzw. umprojizierten Bildern enthalten. Die Formel (5.1-2) und die Tabelle 5.1-2 gelten also auch für perspektiv entzerrte Bilder. Mißt man den radialen Abstand  $r$  im Orthophoto, also im entzerrten Bild, und setzt man für  $m_D$  die Maßstabszahl des Originalbildes ein, dann bekommt man die Bildversetzung  $\Delta r$  im Orthophoto.

Eine wichtige Auswertung der Formel (5.1-2) für die praktische Anwendung der perspektiven Entzerrung ist in der Tab. 5.1-6 zusammengefaßt. Für gängige Bild- und Orthophotomaßstäbe wurde jeweils die erlaubte Höhendifferenz  $\Delta Z$  berechnet, für die eine noch tolerierbare Bildversetzung von 1 mm im Orthophoto auftritt. Dabei wurden ein Orthophotoformat  $50 \times 50 \text{ cm}^2$  sowie Überweit- bis Normalwinkelaufnahmen unterstellt.

Orthophoto- maßstab	Bild- maßstab	c = 9	c = 15 [ cm ]	c = 21	c = 30
1:1000	1:3000	1	1	2	3 m
	1:6000	2	3	4	5 m
1:2500	1:7500	2	3	4	6 m
	1:15000	4	6	9	13 m
1:5000	1:15000	4	6	9	13 m
	1:30000	8	13	18	26 m
1:10000	1:30000	8	13	18	26 m
	1:60000	15	26	36	51 m

Tab. 5.1-6: Erlaubte Höhendifferenz  $\Delta Z$  eines Geländepunktes von der für die perspektive Entzerrung verwendeten Bezugsebene bei einem noch tolerierbaren Fehler von 1 mm in den Ecken des Orthophotos und einem Orthophotoformat von  $50 \times 50 \text{ cm}^2$



Zahlenbeispiel: Von einer Luftaufnahme 1:15000 mit einer Reihenmeßkamera RMK 30/23 (3.1.1.1) wird ein Orthophoto 1:5000 hergestellt. In diesem Fall dürfen die Höhendifferenzen im Gelände 13 m groß sein, wenn man einen Fehler im Orthophoto von 1 mm toleriert.

Die Tabelle 5.1-6 bringt für kleinere Bildmaßstäbe zum Ausdruck, daß ebene Landstriche durchaus mit der perspektiven Entzerrung bearbeitet werden können und daß sich Normalwinkelaufnahmen wesentlich besser als weitwinkelige Aufnahmen für die Orthophotoherstellung eignen. Die Beschränkung auf den zentralen Teil des Bildes bringt - wie jeweils die zweite Zeile zeigt - bezüglich der Genauigkeit zwar günstigere, bezüglich der photographischen Qualität jedoch wegen der stärkeren Vergrößerung deutliche Detailverluste. Die perspektive Entzerrung versagt bereits bei etwas hügeligem Gelände. Für solche Entzerrungen ist anstatt der perspektiven Entzerrung die Differentialentzerrung, die im Abschnitt 5.1.5 besprochen wird, einzusetzen. Die Facettenmethode kann den Umstieg auf das strenge Verfahren etwas hinauschieben.

Aufgabe 5.1-4: Aus einem Luftbild, das mit einer RMK 15/23 (3.1.1.1) mit einem Bildmaßstab von etwa 1:7800 aufgenommen wurde, wurde durch perspektive Entzerrung ein Orthophoto 1:2500 hergestellt. Wie groß ist der Fehler in diesem Orthophoto an einer Bildstelle, die im Orthophoto 20 cm vom Bildmittelpunkt entfernt ist und eine Autobahn 8 m über einer Geländeebene darstellt?

### 5.1.3 Vereinfachte Zweibildauswertung

Die Zweibildauswertung setzt innerhalb des Flugstreifens eine Längsüberdeckung der Bilder von ca. 60% voraus (4.1.1.1d). Sie stützt sich auf die räumliche Betrachtung bzw. Stereoskopie, die für die Interpretation des Bildinhaltes von großer Bedeutung ist, worauf im Abschnitt 5.3 näher eingegangen wird. Bevor im Abschnitt 5.1.4 die strengen Methoden der Zweibildauswertung besprochen werden, gehen wir in diesem Abschnitt auf die vereinfachten Verfahren ein, die häufig im Hintergrund einer thematischen Interpretation ablaufen.

Das einfachste Zweibildauswertegerät ist ein Linienstereoskop (Bild 5.1-7). Die von den Bildern kommenden und von den Linsen austretenden Strahlen sind nahezu parallel, sodaß die Betrachtung mit parallel gerichteten und auf die Ferne akkommodierten Augen erfolgen kann.

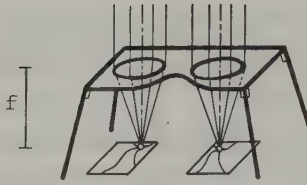


Bild 5.1-7: Linsenstereoskop

Die Stereobilder müssen den Voraussetzungen des natürlichen räumlichen Sehens genügen: Sie müssen in Richtung der Betrachtungsbasis Parallaxen aufweisen, die durch unterschiedliche Aufnahme Standpunkte entstehen, und sie dürfen quer zur Betrachtungsbasis keine Parallaxen haben, was durch parallele Aufnahmerrichtungen erreicht wird. Liegen solche Stereobilder unter dem Linsenstereoskop, so kommen auf die Netzhäute zwei verschiedene Bilder, die zu einem räumlichen Bild - also zu einem optischen Geländemodell - verschmolzen werden.

Haben wir keine exakten Senkrechtaufnahmen, sondern - wie in der Praxis - nur genäherte Senkrechtaufnahmen, dann sind für die Stereoskopie gewisse Vorbereitungen zu treffen, die anhand des Bildes 5.1-8 erläutert werden. Zuerst ist der Bildhauptpunkt  $H_1$  des linken Bildes in das rechte Bild auf Grund seiner photographierten Umgebung zu übertragen. Anschließend geschieht mit dem Hauptpunkt  $H_2$  das analoge. Die Ausrichtung der beiden Bilder entlang den Verbindungsgeraden der entsprechenden Hauptpunkte schafft - zumindest für den Bereich dieser Verbindungsgeraden - die Voraussetzungen für die Stereoskopie: In Richtung der Betrachtungsbasis gibt es Parallaxen und quer dazu keine. Mit wachsendem Abstand der Bildbereiche von

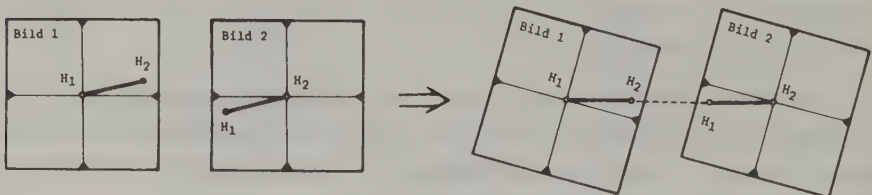
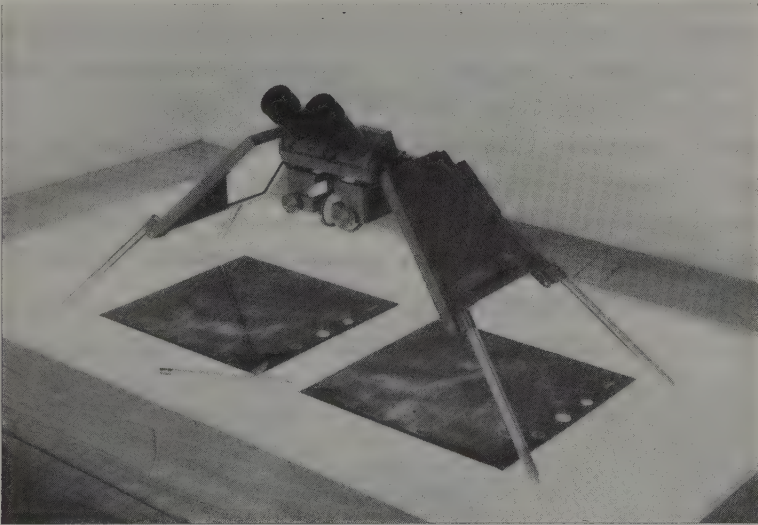


Bild 5.1-8: Orientierung von genäherten Senkrechtaufnahmen für die räumliche Betrachtung

der Verbindungsgeraden der Hauptpunkte treten Parallaxen quer zur Betrachtungsbasis auf. Genäherte Senkrechtaufnahmen kann man deshalb nur ausschnittsweise räumlich betrachten. Von Bereich zu Bereich ist eines der beiden Bilder senkrecht zur Betrachtungsbasis zu verschieben.

Mit dem Linsenstereoskop (Bild 5.1-7) können nur kleinformatige Stereobilder, die entweder durch Verkleinerung oder Zuschneiden der ursprünglichen Meßbilder entstehen, betrachtet werden. Für die Feldarbeit ist das Linsenstereoskop das adäquate Instrument. Im Labor benutzt man dagegen Spiegelstereoskope, die die Betrachtung der 23 x 23 cm großen Meßbilder erlauben (Bild 5.1-9).



*Bild 5.1-9: Spiegelstereoskop*

Der Raumeindruck, den der Betrachter aus den Stereobildern mit den Stereoskopen bekommt, entspricht nicht den tatsächlichen räumlichen Verhältnissen des Geländes, sondern das betrachtete Geländemodell ist überhöht. Der Überhöhungsfaktor  $u_z$  hängt vom Kameratyp bzw. dem damit festgelegten Basis/Höhenverhältnis und im gewissen Umfang auch vom Betrachter selbst ab. In der Tab. 5.1-10 sind repräsentative Überhöhungsfaktoren für die verschiedenen Kameratypen zusammengestellt (Ableitung A 4.3.1.2).

Kameratyp	NW	ZW	W	ÜWW
c (cm)	30	21	15	9
Basis/Höhe	1:3.3	1:2.3	1:1.6	1:0.95
$u_z$	1.9	2.7	3.8	6.3

Tab. 5.1-10: Überhöhungsfaktor  $u_z$  bei der Betrachtung von Stereobildern (60% Längsüberdeckung)

Als nächste Gerätegruppe sollen die Stereointerpretationsgeräte mit einer Entzerrungsvorrichtung angesprochen werden. Bild 5.1-11 zeigt ein typisches Gerät dieser Gruppe. Ein Luftbild, das mit Hilfe eines zweiten Luftbildes stereoskopisch wahrgenommen wird, wird mit einer Karte bzw. Kartenausschnitt zur Deckung gebracht. Die Einpassung dieses einen Luftbildes auf die Karte erfolgt zonenweise nach der Facettenmethode (5.1.2). Dabei kann das Luftbild innerhalb einer Facette mit optischen Hilfsmitteln maßstäblich verändert, gedreht und gestaucht bzw. gedehnt werden. Die stereoskopisch ermittelten Interpretationsergebnisse können dann direkt in der Karte oder auf einer Deckfolie maßstabsgetreu festgehalten werden. Die Karte wird dabei wahlweise in das Stereomodell eingeblendet.

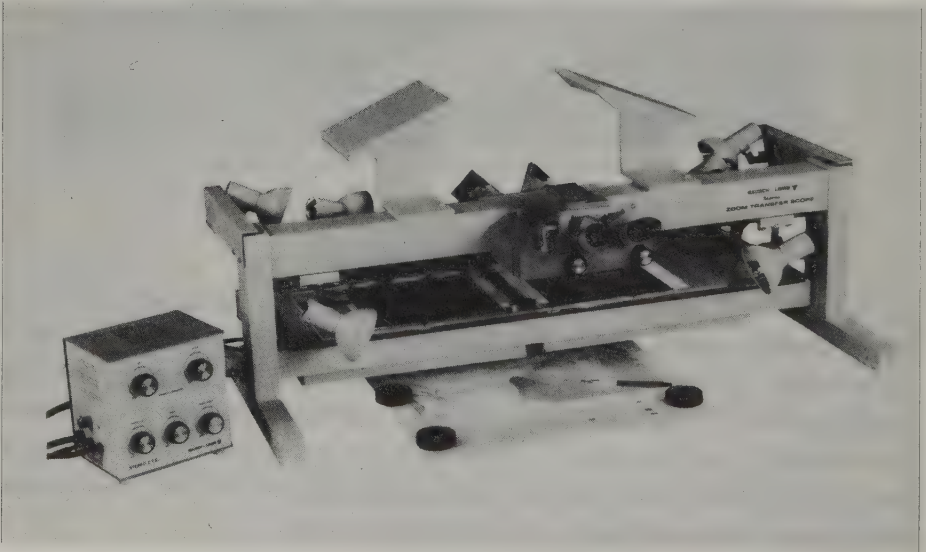


Bild 5.1-11: Stereo-Zoomtransferskop der Fa. Bausch & Lomb



Wir wenden uns nun der höhenmäßigen Auswertung von Stereobildern mittels des sogenannten Stereometers zu (Bild 5.1-12 und 5.1-13 links). Ein Stereometer besteht aus zwei Meßmarken, die stereoskopisch zu einer räumlichen Meßmarke verschmolzen werden. Die beiden Meßmarken sind dann an korrespondierenden Stellen in beiden Bildern, wenn die räumliche Meßmarke auf dem optischen Geländemodell "aufsitzt". Diese Konstellation kann an einer Skala der verschiebbaren Meßmarke abgelesen werden. Stellt man dann einen zweiten Punkt im Stereomodell ein und liest wieder an der Skala ab<sup>1</sup>, so bildet die Differenz der beiden Ablesungen die sogenannte Parallaxendifferenz  $\Delta p_x$ .



Bild 5.1-12: Stereometer

Aus dieser Parallaxendifferenz kann der Höhenunterschied  $dZ$  der beiden Geländepunkte nach folgender Formel berechnet werden (Ableitung A 4.3.3):

$$dZ = \frac{\text{Flughöhe ü. Grund}}{\text{Basis im Bild}} \Delta p_x \quad (5.1-4a)^2$$

Für größere Höhenunterschiede  $\Delta Z$  ist der Höhenunterschied  $dZ$  der Formel (5.1-4a) noch wie folgt zu verbessern:

- 1 Beim Stereo-Zoomtransferskop (Bild 5.1-11) erfolgt der Abgriff von der Skala digital und steht damit direkt für die EDV-technische Weiterverarbeitung zur Verfügung.
- 2 Von dieser Formel kann auch das Genauigkeitsgesetz für die stereoskopische Höhenmessung, und zwar sowohl für die Näherungsverfahren (5.1.3) als auch für die strengen Verfahren (5.1.4), abgelesen werden: Die Höhengengenauigkeit verschlechtert sich proportional mit der Flughöhe. Die Basis im Bild und die Parallaxenmeßgenauigkeit sind Konstante. Sie sind mit ca. 10 cm bzw.  $\pm 0.01$  mm anzusetzen, sodaß die Höhengengenauigkeit 0.1 % der Flughöhe beträgt. Aus Luftaufnahmen, erflogen in 2000 m Höhe, können also Geländehöhen mit einer Genauigkeit von  $2000 \cdot 0.0001 = \pm 20$  cm bestimmt werden.

$$\Delta Z = dZ \left( 1 - \frac{dZ}{\text{Flughöhe ü. Grund}} \right) \quad (5.1-4b)$$

Die Basis  $b$  im Bild kann man sich entweder aus der Flugplanung berechnen (Tab. 4.1-3) oder man mißt sie direkt im Luftbild. Die Basis  $b$  ist nämlich der Abstand der beiden Hauptpunkte  $\overline{H_1 H_2}$  in einem der beiden Luftbilder (Bild 5.1-8).

Zahlenbeispiel: In einem (Stereo-)Bildpaar wurde die Meßmarke in einer Waldlichtung am Boden und auf der Spitze eines an dieser Lichtung stehenden Baumes aufgesetzt. Die Parallaxendifferenz  $\Delta p_x$  beträgt 3.28 mm. Die Basis  $b$  im Luftbild wird mit 92.5 mm gemessen. Die Flughöhe über Grund beträgt 550 m.

$$(5.1-4a): dZ = 550 \cdot 3.28 / 92.5 = 19.5 \text{ m}$$

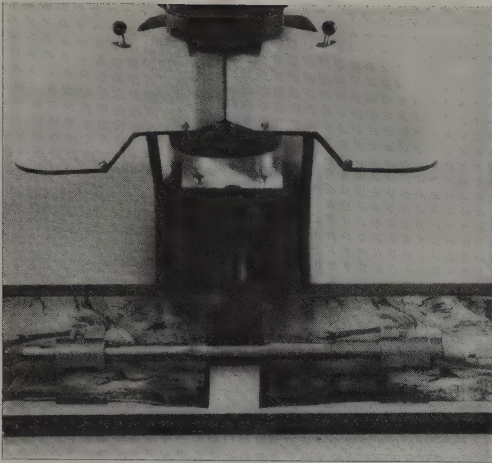
$$(5.1-4b): \Delta Z = 19.5 (1 - 19.5 / 550) = 18.8 \text{ m}$$

Aufgabe 5.1-5: Wie unsicher ist die im letzten Zahlenbeispiel ermittelte Baumhöhe in Anbetracht der Meßunsicherheit für die Parallaxendifferenz  $\Delta p_x$  von  $\pm 0.02$  mm? Diese Meßunsicherheit wird bei der photogrammetrischen Höhenbestimmung noch überlagert von einer verhältnismäßig großen Unsicherheit beim stereoskopischen Aufsetzen der Meßmarke auf die Wipfel.

Aufgabe 5.1-6: Aus einem Stereobildpaar, das mit einer Reihenmeßkamera RMK 15/23 (3.1.1.1) mit 55% Längsüberdeckung und einem Bildmaßstab 1:4500 aufgenommen wurde, soll die Höhe einer Böschung ermittelt werden. Die Parallaxendifferenz  $\Delta p_x$  zwischen der Einstellung Böschungsunterkante und Böschungsoberkante beträgt 1.12 mm. Wie hoch ist die Böschung? Wie unsicher ist dieser Höhenunterschied?

So einfach diese Methode der Höhenbestimmung sich darbietet, so gefährlich ist sie in ihrer Anwendung. Die Neigungen der genäherten Senkrechtaufnahmen bewirken nämlich Modelldeformationen (A 4.2.3.5b). Das bedeutet, daß die beiden Punkte, deren Höhenunterschied festgestellt werden soll, innerhalb etwa eines Zentimeters im Meßbild nebeneinander liegen müssen.

Die Stereometergeräte werden hin und wieder auch zur lagemäßigen Kartierung benutzt, wobei der Zeichenstift entweder parallel zum Stereometer (Bilder liegen fest) oder parallel zum Bildwagen (Meßmarken sind stationär, Bild 5.1-13) geführt wird. Eine solche Grundrißkartierung ist nur in Ausnahmefällen zu akzeptieren. Sie ist nämlich mit allen Lagefehlern behaftet, die in einem Meßbild enthalten sind und im Abschnitt 5.1.1 ausführlich behandelt wurden.



*Bild 5.1-13: Wild Aviopret APT 2 (mit Zeichenvorrichtung)*

Bild 5.1-13 zeigt das weitverbreitete Stereointerpretationsgerät Aviopret APT 2, das folgende Merkmale besitzt:

- kontinuierlich einstellbare optische Vergrößerung getrennt für jedes Bild,
- Verschiebbarkeit eines Bildes oder eines Teiles der Betrachtungsoptik zur Beseitigung der senkrecht zur Betrachtungsbasis auftretenden Parallaxen bei genäherten Senkrechtaufnahmen,
- Betrachtungsoptik für einen zweiten Beobachter (besonders wichtig für das Training der Interpreten),
- Möglichkeit der Photographie einzelner Bildausschnitte,
- Betrachtung im Durchlicht (Film) und Auflicht (Papier).

#### 5.1.4 Strenge Zweibildauswertung

Die strenge Zweibildauswertung liefert die ausgewerteten Punkte und Linien in einem dreidimensionalen XYZ-Koordinatensystem. Das Verständnis der strengen Zweibildauswertung setzt einige mathematische Kenntnisse voraus.

#### 5.1.4.1 Mathematische Vorbemerkungen

Der mathematische Zusammenhang zwischen den zweidimensionalen Bildkoordinaten  $x$  und  $y$  und den dreidimensionalen Objektkoordinaten  $X$ ,  $Y$  und  $Z$ , die in der Regel den Landeskoordinaten entsprechen, beschreiben die folgenden Gleichungen (Ableitung A 5.3.1):

$$\begin{aligned} x &= -c \frac{r_{11}(X-X_0) + r_{21}(Y-Y_0) + r_{31}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0) + r_{23}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)} \\ y &= -c \frac{r_{12}(X-X_0) + r_{22}(Y-Y_0) + r_{32}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0) + r_{23}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)} \end{aligned} \quad (5.1-5)$$

Eine Auflösung nach  $X$  und  $Y$  ergibt:

$$\begin{aligned} X &= X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}x + r_{12}y - r_{13}c}{r_{31}x + r_{32}y - r_{33}c} \\ Y &= Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}x + r_{22}y - r_{23}c}{r_{31}x + r_{32}y - r_{33}c} \end{aligned} \quad (5.1-6)^1$$

Die Gleichungen werden als Kollinearitätsbeziehungen bezeichnet, weil sie zum Ausdruck bringen, daß der Aufnahmeort  $O$  mit dem Bildpunkt  $P'$  und dem Objektpunkt  $P$  zum Zeitpunkt der Aufnahme auf einer Geraden angeordnet sind (Bild 5.1-14). In den Kollinearitätsgleichungen kommen sowohl die Elemente der inneren als auch die der äußeren Orientierung vor.

Die Elemente der inneren Orientierung legen bekanntlich das Projektionszentrum  $O$  gegenüber der Bildebene fest, und zwar mit Hilfe einer im Hauptpunkt  $H$  orthogonal stehenden Kammerkonstanten  $c$ .

Die Elemente der äußeren Orientierung legen

- das Projektionszentrum  $O$  mit den Koordinaten  $X_0, Y_0, Z_0$  und
  - die Stellung des Bildes in Form der Bildneigungen  $\omega$  und  $\phi$  sowie der Verkantung  $\kappa$
- im Landeskoordinatensystem fest.

<sup>1</sup> Für den Fall, daß die Aufnahmerichtung näherungsweise lotrecht angeordnet ist, werden im Abschnitt 6.4.2.3 lineare Gleichungen angegeben.



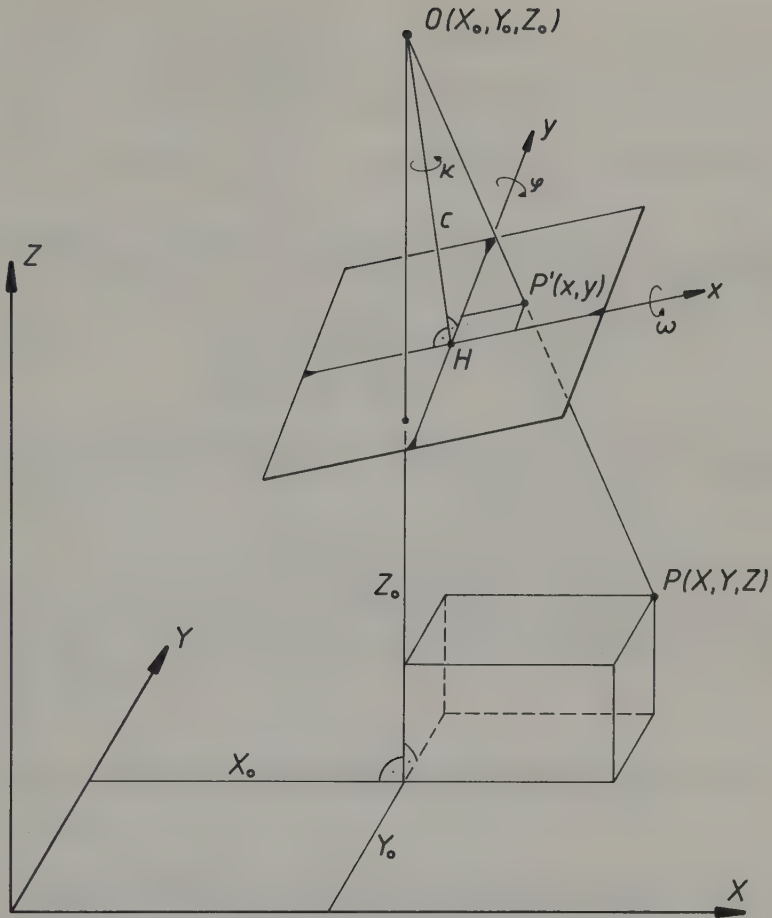


Bild 5.1-14: Zusammenhang zwischen Bild- und Landeskoordinaten  
(Kollinearitätsbeziehung)

Die drei Winkel  $\omega, \phi, \kappa$  sind in den Parametern  $r_{ik}$  der Gleichungen (5.1-5) und (5.1-6) enthalten. Die Parameter  $r_{ik}$  definieren eine sogenannte Drehmatrix  $\underline{R}$ , die mit  $\omega$  (Drehung um Primärachse),  $\phi$  (Drehung um Sekundärachse) und  $\kappa$  (Drehung um Tertiärachse) folgenden Aufbau hat (Ableitung B 3.3):

$$\underline{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi \cos\alpha & -\cos\phi \sin\alpha & \sin\phi \\ \cos\omega \sin\alpha + \sin\omega \sin\phi \cos\alpha & \cos\omega \cos\alpha - \sin\omega \sin\phi \sin\alpha & -\sin\omega \cos\phi \\ \sin\omega \sin\alpha - \cos\omega \sin\phi \cos\alpha & \sin\omega \cos\alpha + \cos\omega \sin\phi \sin\alpha & \cos\omega \cos\phi \end{pmatrix} \quad (5.1-7)$$

Zahlenbeispiel: Gegeben sind die Elemente der äußeren Orientierung, d.h. die drei Winkel  $\omega = -1.3948$  gon,  $\phi = 0.1041$  gon,  $\alpha = -0.8479$  gon. Damit lautet die Drehmatrix  $\underline{R}$ :

$$(5.1-7): \underline{R} = \begin{pmatrix} 0.999910 & 0.013319 & 0.001635 \\ -0.013351 & 0.999671 & 0.021907 \\ -0.001343 & -0.021927 & 0.999759 \end{pmatrix}$$

Zur äußeren Orientierung gehören noch die Koordinaten  $X_0, Y_0, Z_0$  des Aufnahmeortes O:

$$X_0 = 62530.60 \text{ m}$$

$$Y_0 = 61215.83 \text{ m}$$

$$Z_0 = 2005.74 \text{ m}$$

Die innere Orientierung beträgt:  $c = 152.67$  mm.

Somit können für jeden beliebigen Objektpunkt P mittels (5.1-5) die Bildkoordinaten  $x, y$  des jeweiligen Punktes P' berechnet werden. Z.B. soll ein Geländepunkt P folgende Landeskoordinaten  $X, Y, Z$  haben:  $X = 63552.12$  m

$$Y = 61488.05 \text{ m}$$

$$Z = 588.08 \text{ m}$$

$$x = -152.67 \frac{0.999910 \cdot 1021.52 + (-0.013351) \cdot 272.22 + (-0.001343) \cdot (-1417.66)}{0.001635 \cdot 1021.52 + 0.021907 \cdot 272.22 + 0.999759 \cdot (-1417.66)} = 110.43 \text{ mm}$$

$$y = -152.67 \frac{0.013319 \cdot 1021.52 + 0.999671 \cdot 272.22 + (-0.021927) \cdot (-1417.66)}{0.001635 \cdot 1021.52 + 0.021907 \cdot 272.22 + 0.999759 \cdot (-1417.66)} = 34.31 \text{ mm}$$

Aufgabe 5.1-7: Man überlege sich, wie man aus der räumlichen Drehmatrix  $\underline{R}$  die drei Winkel  $\omega, \phi, \alpha$  erhält. Für das Zahlenbeispiel führe man diese Berechnung durch.

In der Photogrammetrie hat man es in der Regel mit einer anders gelagerten Aufgabe zu tun: Die sechs Elemente der äußeren Orientierung sind unbekannt. Bekannt sind die Elemente der inneren Orientierung. Zur Ermittlung der Elemente der äußeren Orientierung benutzt man Paßpunkte  $P_i$ : Von einem Paßpunkt  $P_i$  kennt man seine drei Landeskoordinaten  $X_i, Y_i, Z_i$ ; seine zwei Bildkoordinaten  $x_i, y_i$  mißt man. Damit liefert ein Paßpunkt  $P_i$  ein Gleichungspaar vom Typ (5.1-5) unter Beachtung der Beziehung (5.1-7). Da insgesamt sechs Elemente der äußeren Orientierung aus Paßpunkten zu bestimmen sind, benötigt man mindestens drei Paßpunkte, die folgendes, kompakt geschrie-

benes Gleichungssystem ergeben:

$$\begin{aligned} x_i &= f(c, \underline{x}_0, \underline{y}_0, \underline{z}_0, \underline{\omega}, \underline{\phi}, \underline{x}, X_i, Y_i, Z_i) \\ y_i &= f(c, \underline{x}_0, \underline{y}_0, \underline{z}_0, \underline{\omega}, \underline{\phi}, \underline{x}, X_i, Y_i, Z_i) \quad i = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (5.1-8)$$

Dieses Gleichungssystem, in dem die Unbekannten unterstrichen sind, ist leider nicht linear. Es wird linearisiert und im allgemeinen über eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate (Anhang 6.4-1) gelöst, zumal in der Praxis meistens mehr als drei Paßpunkte bzw. mehr als sechs Gleichungen für die Bestimmung der sechs Unbekannten gegeben sind. Dieses Verfahren ist unter dem Namen räumlicher Rückwärtsschnitt bekannt und ist im Abschnitt A 5.3.7.1 näher beschrieben.

Bei der Zweibildauswertung bestimmen wir die Elemente der äußeren Orientierung für die beiden Meßbilder gemeinsam, d.h. bei der sogenannten Doppelbildeinschaltung sind insgesamt 12 Unbekannte zu bestimmen. Für jeden Paßpunkt  $P_i$ , der in beiden Bildern abgebildet ist, erhält man zwei Gleichungspaare vom Typ (5.1-5), die in kompakter Form wie folgt geschrieben werden können (die 12 Unbekannten sind unterstrichen):

$$\begin{aligned} x_{i1} &= f(c, \underline{x}_{01}, \underline{y}_{01}, \underline{z}_{01}, \underline{\omega}_1, \underline{\phi}_1, \underline{x}_1, X_i, Y_i, Z_i) && \text{Bild 1} \\ y_{i1} &= f(c, \underline{x}_{01}, \underline{y}_{01}, \underline{z}_{01}, \underline{\omega}_1, \underline{\phi}_1, \underline{x}_1, X_i, Y_i, Z_i) \\ x_{i2} &= f(c, \underline{x}_{02}, \underline{y}_{02}, \underline{z}_{02}, \underline{\omega}_2, \underline{\phi}_2, \underline{x}_2, X_i, Y_i, Z_i) && \text{Bild 2} \\ y_{i2} &= f(c, \underline{x}_{02}, \underline{y}_{02}, \underline{z}_{02}, \underline{\omega}_2, \underline{\phi}_2, \underline{x}_2, X_i, Y_i, Z_i) \end{aligned} \quad (5.1-9)$$

Bei der Doppelbildeinschaltung verwendet man aber - wie im Bild 5.1-15 angedeutet - nicht nur Paßpunkte, die mit Dreiecken im Bild 5.1-15 markiert sind, sondern auch Neupunkte bzw. Verknüpfungspunkte (der Punkt  $P_4$  ist ein solcher Punkt). Für jeden Neupunkt kommen zwar drei weitere (2mal unterstrichene) Unbekannte hinzu, aber auch folgende 2 Gleichungspaare vom Typ (5.1-5):

$$\begin{aligned} x_{i1} &= f(c, \underline{x}_{01}, \underline{y}_{01}, \underline{z}_{01}, \underline{\omega}_1, \underline{\phi}_1, \underline{x}_1, \underline{X}_i, \underline{Y}_i, \underline{Z}_i) && \text{Bild 1} \\ y_{i1} &= f(c, \underline{x}_{01}, \underline{y}_{01}, \underline{z}_{01}, \underline{\omega}_1, \underline{\phi}_1, \underline{x}_1, \underline{X}_i, \underline{Y}_i, \underline{Z}_i) \\ x_{i2} &= f(c, \underline{x}_{02}, \underline{y}_{02}, \underline{z}_{02}, \underline{\omega}_2, \underline{\phi}_2, \underline{x}_2, \underline{X}_i, \underline{Y}_i, \underline{Z}_i) && \text{Bild 2} \\ y_{i2} &= f(c, \underline{x}_{02}, \underline{y}_{02}, \underline{z}_{02}, \underline{\omega}_2, \underline{\phi}_2, \underline{x}_2, \underline{X}_i, \underline{Y}_i, \underline{Z}_i) \end{aligned} \quad (5.1-10)$$

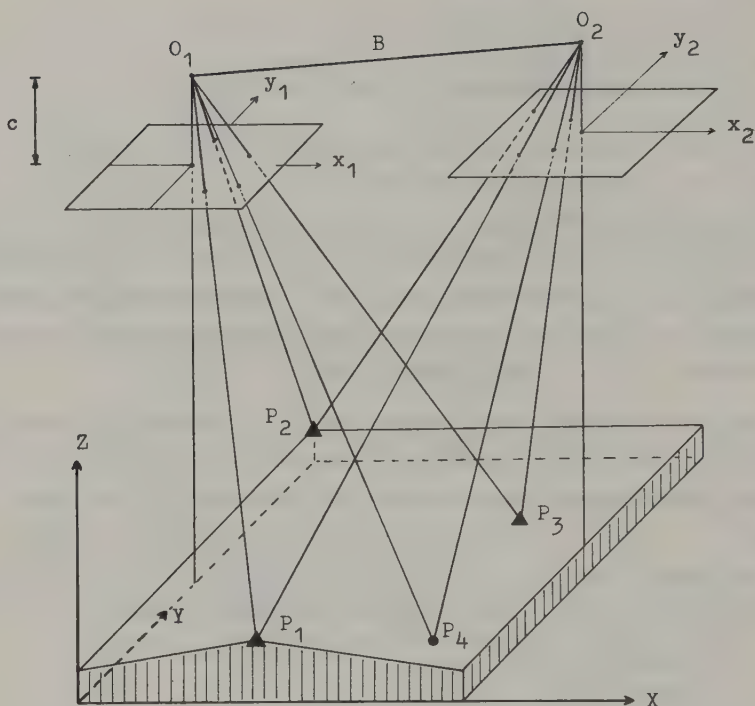


Bild 5.1-15: Doppelbildeinschaltung

In der Praxis verwendet man für die Doppelbildeinschaltung je Stereomodell mindestens vier Paßpunkte in den Modellecken und noch einige Neupunkte. Nach Auflösen des Gleichungssystems (5.1-9) gemeinsam mit (5.1-10) kennt man die 12 Elemente der äußeren Orientierung und von den Neupunkten auch ihre Landeskoordinaten  $X_i, Y_i, Z_i$ . Die notwendige Linearisierung des Gleichungssystems und die Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate ist im Abschnitt A 5.3.7.2 beschrieben.

Als letzter Algorithmus soll der räumliche Vorwärtsschnitt besprochen werden. Er wird nach der Doppelbildeinschaltung, die ja die äußeren Orientierungselemente der beiden Bilder liefert, zur Ermittlung der Landeskoordinaten vieler Punkte im Stereomodell benutzt. Von diesen Punkten mißt man die Bildkoordinaten  $x_1, y_1$  im Bild 1 und die Bildkoordinaten  $x_2, y_2$  im Bild 2. Damit kann für jeden Punkt ein Gleichungspaar (5.1-6) vom Bild 1 und ein entsprechendes Gleichungspaar vom Bild 2 aufgestellt werden. Für die drei



unbekannten Landeskoordinaten  $X, Y, Z$  eines solchen Punktes bekommt man die folgenden vier Gleichungen, die sogar linear sind:

$$X = X_{01} + (Z - Z_{01}) k_{x1} \quad \text{Bild 1}$$

$$Y = Y_{01} + (Z - Z_{01}) k_{y1}$$

(5.1-11)

$$X = X_{02} + (Z - Z_{02}) k_{x2} \quad \text{Bild 2}$$

$$Y = Y_{02} + (Z - Z_{02}) k_{y2}$$

Dabei wurden die Brüche der Gleichungen (5.1-6), die aus den gemessenen Bildkoordinaten, der Kammerkonstanten  $c$  und den Bildneigungen  $\omega, \phi, \chi$  berechnet werden können, mit  $k_x$  und  $k_y$  bezeichnet. Die vierte Gleichung wird für die Kontrolle oder im Rahmen einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate zur Genauigkeitssteigerung benutzt (A 5.3.7.3).

Dieser Abschnitt über mathematische Beziehungen zwischen Bild- und Landeskoordinaten ist mit einem Hinweis auf die Gültigkeit dieser Beziehungen abzuschließen. Das Landeskoordinatensystem wurde hier als dreidimensionales XYZ-System eingeführt, in dem das Gelände in die XY-Ebene (Grundriß) und in die anderen Koordinatenebenen orthogonal projiziert wird.

Die tatsächlichen Landeskoordinaten haben aber andere Bezugsflächen: Die Höhen stehen orthogonal zum Geoid, das in erster Näherung durch ein Ellipsoid und in zweiter Näherung durch eine Kugel und erst in dritter Näherung durch eine Ebene ersetzt werden kann. Die Lagekoordinaten entstehen durch komplizierte mathematische Abbildungsgleichungen des Erdellipsoids in die Ebene, wobei zwangsläufig Verzerrungen auftreten müssen, die aber glücklicherweise verhältnismäßig klein gehalten werden können.

Für die geometrische Auswertung von Meßbildern gelten folgende Faustregeln:

- Der Übergang von der Ebene zur Kugel als Höhenbezugsfläche ist bereits bei Bildmaßstäben kleiner als 1:6000 (Überweitwinkel) bzw. kleiner als 1:10000 (Weitwinkel) bzw. kleiner als 1:20000 (Normalwinkel) zu beachten (A 4.3.6).
- Die komplizierten Eigenschaften der Lagekoordinaten können bei Luftaufnahmen - auch der kleinsten Maßstäbe - unbeachtet bleiben.
- Bei der Auswertung von photographischen Satellitenaufnahmen sind die Höhen in Bezug zum Ellipsoid und die mathematischen Gesetze der Lagekoordinaten im Auswerteprozess zu berücksichtigen (im Abschnitt 5.1.5.2 wird ein Beispiel gebracht).
- Die Krümmung der Lichtstrahlen infolge unterschiedlicher Dichte der Atmosphäre ist ein Einfluß, der als Refraktion bezeichnet und der bei Bildmaßstäben kleiner als 1:30000 nicht mehr vernachlässigt werden kann (A 4.3.5).

Aufgabe 5.1-8: Gegeben sind die äußeren Orientierungselemente von zwei Meßbildern. Für einen Punkt hat man im Bild 1 und im Bild 2 die Bildkoordinaten gemessen. Gesucht sind die Landeskoordinaten des Objektpunktes. Der Aufnahmeort  $O_2$  des Bildes 2 hat die Koordinaten  $X_{02} = 63540.10$ ,  $Y_{02} = 61235.02$ ,  $Z_{02} = 2010.80$ . Die Drehmatrix des Bildes 2 lautet

$$R_2 = \begin{pmatrix} 0.999855 & 0.000000 & -0.017057 \\ 0.000046 & 0.999996 & 0.002692 \\ 0.017057 & -0.002692 & 0.999851 \end{pmatrix}.$$

Den Aufnahmeort und die Drehmatrix des Bildes 1 entnehme man dem Zahlenbeispiel dieses Abschnittes. Die gemessenen Bildkoordinaten lauten:

$$\begin{array}{ll} x_1 = 110.43 \text{ mm} & x_2 = -1.31 \text{ mm} \\ y_1 = 34.31 \text{ mm} & y_2 = 27.58 \text{ mm} \end{array}$$

Die Kammerkonstante  $c$  beträgt 152.67 mm.

Ergebnis:  $X = 63552.12$ ,  $Y = 61488.05$ ,  $Z = 588.08$ .

#### 5.1.4.2 Analytische Auswertegeräte

Ein analytisches Auswertegerät der einfacheren Bauart ist das Stereocord G3 der Fa. Zeiss (Bild 5.1-16). Es besteht aus

- einem Koordinatenmeßgerät zur Ermittlung der insgesamt vier Bildkoordinaten für jeden Punkt im Stereomodell,
- einem Computer mit entsprechender Peripherie, mit dessen Software einerseits der Zusammenhang zwischen den Bild- und den Landeskoordinaten hergestellt und andererseits fachspezifische Aufgabenstellungen gelöst werden können, sowie
- einem digital gesteuerten Zeichengerät.

Die Arbeitsweise kann anhand des Funktionsschemas 5.1-17 erläutert werden:

- a) Auflegen des Bildpaares auf den Bildträger.
- b) Eingabe der inneren Orientierung und der Landeskoordinaten der Paßpunkte mit der Tastatur in den Computer.
- c) Messung der Bildkoordinaten von Paßpunkten und einigen Neupunkten.
- d) Berechnung der äußeren Orientierungselemente für die beiden Bilder mittels Doppelbildeinschaltung (Gleichungen 5.1-9 und 5.1-10). Ausgabe der Orientierungsergebnisse auf einem Drucker (Genauigkeitskontrolle!).
- e) Messung der Bildkoordinaten von Einzelpunkten und von Punkten entlang der Linienzüge, die im Landeskoordinatensystem gesucht sind. Die Ermittlung der Landeskoordinaten geschieht mit räumlichen Vorwärtsschnitten (Gleichung (5.1-11)).
- f) Übertragung der - z.B. XY-Koordinaten - an das Zeichengerät, das den Grundriß der abgefahrenen Linienzüge zeichnet. Anstelle der Grundrißlinien kann man auch aus den XY-Koordinaten die Länge  $T$  des Linienzuges berechnen und dann am Zeichengerät in einem TZ-Koordinatensystem ein Längsprofil darstellen lassen.
- g) Den ausgewerteten Linien und Punkten kann man auch ihre Bedeutung in der Form von Codes, die man am Bildschirm vor dem Abfahren einer Linie bzw. Einstellen eines Punktes eingibt, zuordnen. Auf diese Weise entsteht ein Datensatz mit verschiedenen Stricharten, Farben und Symbolen.

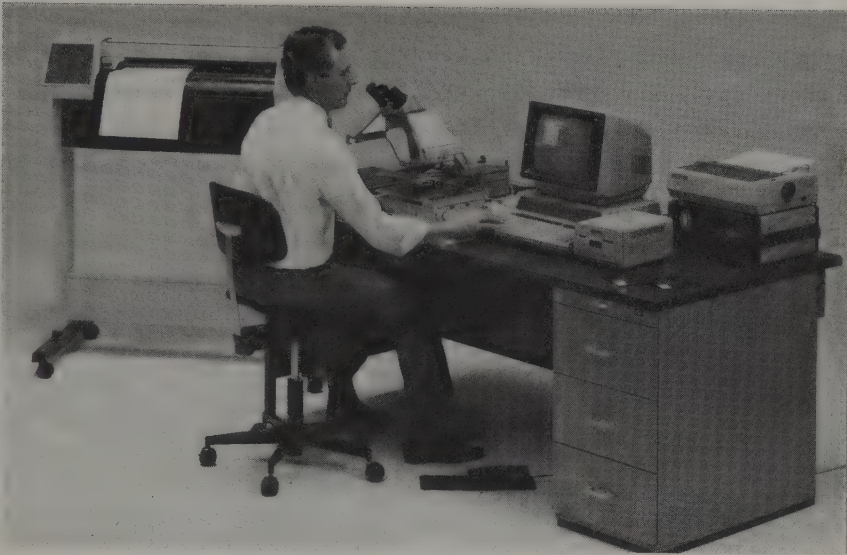


Bild 5.1-16: Stereocord G3 der Fa. Zeiss mit Steuergerät (Direc 2) und Tischrechner (HP 86) sowie Zeichengerät (HP 7580)

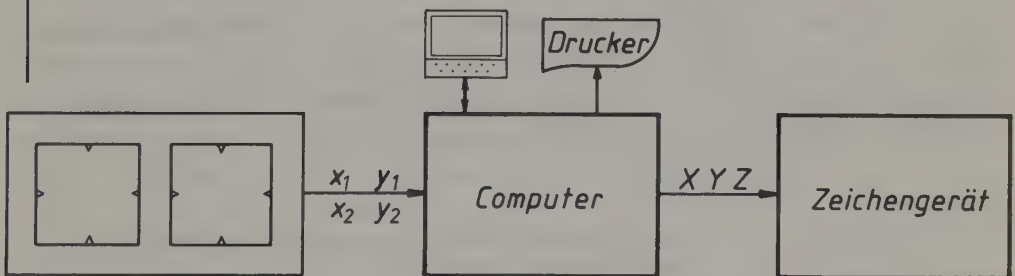


Bild 5.1-17: Funktionsschema zum Stereocord

- h) Der Computer kann aus den temporär gespeicherten Landeskoordinaten auch abgeleitete Größen berechnen und am Drucker oder am Zeichengerät ausgeben. Ein typisches Beispiel ist das sogenannte Streichen und Fallen einer Ebene, die durch drei eingemessene Punkte festgelegt ist. Weitere Beispiele sind die Flächen- und Volumenberechnung.

Höher entwickelte analytische Zweibildauswertegeräte zeichnen sich insbesondere dadurch aus, daß vom Bildträger nicht nur Informationen in den Computer gelangen, sondern daß der Computer auch die Position der Bilder in

Bezug zur Meßmarke steuern kann (Bild 5.1-18). Zur Ermittlung der Orientierung der Bilder, also zur Bestimmung der äußeren Orientierungselemente, zieht man aus dieser Einrichtung keinen zusätzlichen Nutzen; beim Ausmessen des Stereomodell es ergeben sich aber große Vorteile. Mit zwei Handrädern und einer Fußscheibe gibt der Operateur die XYZ-Landeskoordinaten vor; daraus rechnet der Computer mit den Beziehungen (5.1-5) die Bildkoordinaten  $x_1, y_1, x_2, y_2$ . Der Computer verschiebt dann die beiden Bilder so, daß die beiden Meßmarken mit den zwei berechneten Bildpunkten zusammenfallen. Da der Operateur Meßmarke und optisches Geländemodell räumlich sieht, kann er mittels weiterer XY- und/oder Z-Bewegungen die Meßmarke am Gelände aufsetzen bzw. dem Gelände entlang führen. Bei dieser Arbeitsweise treten auch keine störenden Parallaxen quer zur Betrachtungsbasis auf wie beim Gerät des Funktionsschemas 5.1-17, bei dem diese störenden Parallaxen manuell weggestellt werden müssen.

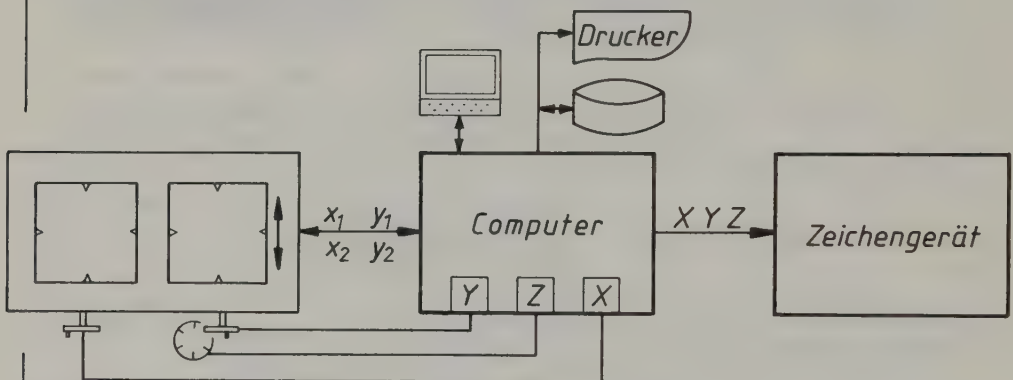


Bild 5.1-18: Funktionsschema eines universellen analytischen Zweibildauswertegerätes

Während des kontinuierlichen Führens der Meßmarke entlang von räumlichen Geländelinien (Straßenbegrenzungen, Waldbegrenzungen, Geländekanten etc.) sorgt der Computer für die Speicherung der XYZ-Koordinaten und/oder Weitergabe dieser Koordinaten an das Zeichengerät. Die Abstände der digitalisierten Punkte können nach konstantem Weg- oder Zeitintervall gewählt werden. Bringt man die Z-Koordinate auf den Wert einer Höhenlinie und führt man die Meßmarke nur mit XY-Bewegungen dem Gelände entlang, so digitalisiert man eine Höhenlinie.



Von den verschiedenen Auswertemodi sollen nur noch zwei erwähnt werden, die mit der computergestützten Positionierung der Meßmarke zusammenhängen. In den meisten analytischen Auswertegeräten kann man ein EDV-Programm aktivieren, das die Meßmarke an die Punkte eines Quadratrasters in der XY-Ebene führt. Der Operateur stellt dann mit der Z-Bewegung die richtige Höhe für jeden Geländepunkt ein. So entsteht ein digitales Geländemodell auf Rasterbasis. Solche rasterförmigen digitalen Geländemodelle benötigt man z.B. für die Orthophotographie (siehe Bild 5.1-33 im Abschnitt 5.1.5).

Für die Interpretation des Waldbestandes bewährt sich die computergestützte Steuerung der Meßmarke besonders: Mit den Luftbildern des Zeitpunktes  $t_1$  wurden z.B. die einzelnen Bäume mit den XYZ-Koordinaten und ihren Vitalitätsklassen festgehalten. Nach der Orientierung der Luftbilder des Zeitpunktes  $t_2$  kann man mit den bekannten XYZ-Koordinaten die Meßmarke automatisch an die einzelnen Bäume, die zum Zeitpunkt  $t_1$  interpretiert wurden, positionieren lassen. Dadurch sieht man sofort die höhenmäßige Veränderung zwischen den verschiedenen Zeitpunkten und die Änderung des Vitalitätszustandes. Die Vitalitätsklasse des Zeitpunktes  $t_1$  sollte zu diesem Zweck am Bildschirm angezeigt werden. Bild 5.1-19 zeigt ein Beispiel einer solchen koordinatengebundenen Einzelbauminterpretation: Jeder Baum ist im Landeskoordinatensystem, das als Raster mit Randbeschriftung auch vom Zeichengerät wiedergegeben wird, festgehalten. Für die beiden auftretenden Baumarten wurden zwei verschiedene Symbole eingeführt, die in ihrer Größe auf die Durchmesser der Baumkronen abgestimmt sind. Die Vitalitätsstufen sind mit Ziffern zwischen 1 und 4 festgehalten. An einigen Punkten ist die Geländehöhe angegeben.

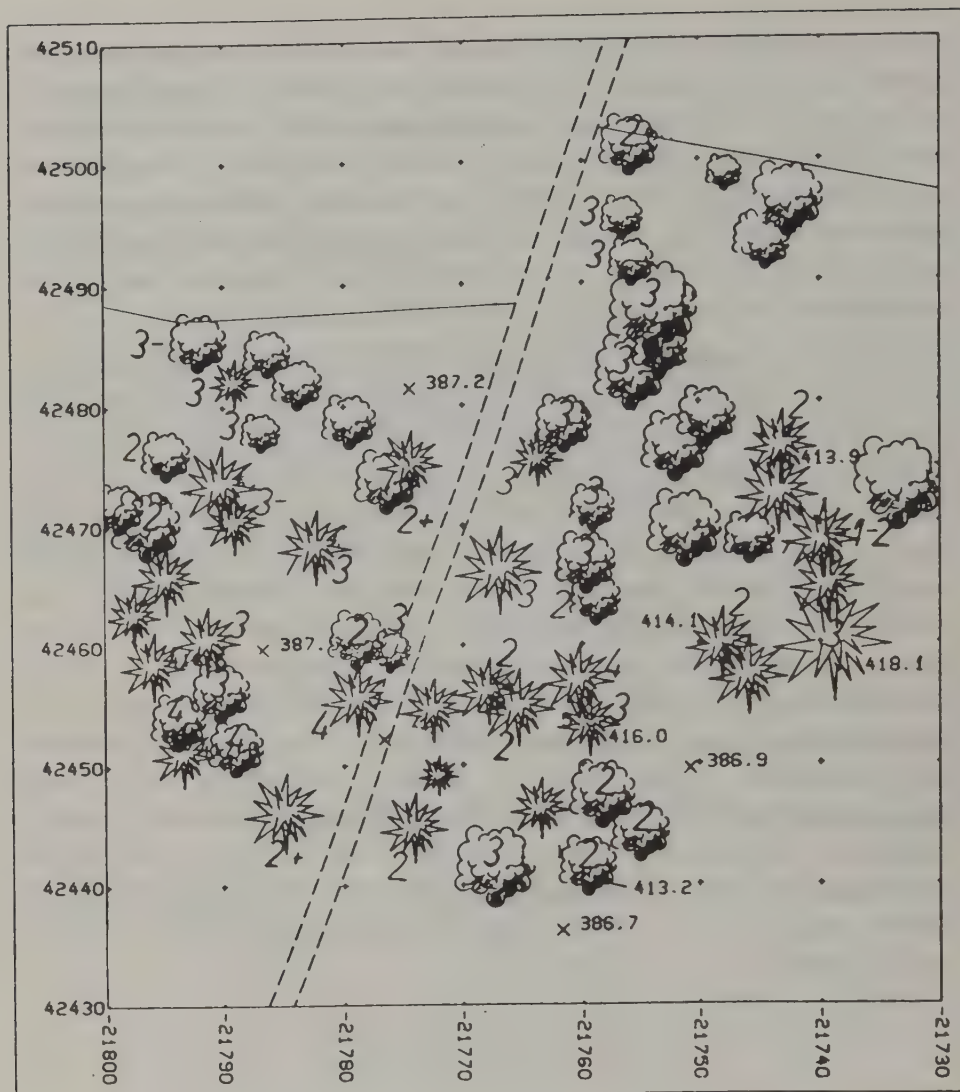


Bild 5.1-19: Koordinatengebundene Einzelbauminterpretation  
(Diplomarbeit M. Ehgartner am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien)

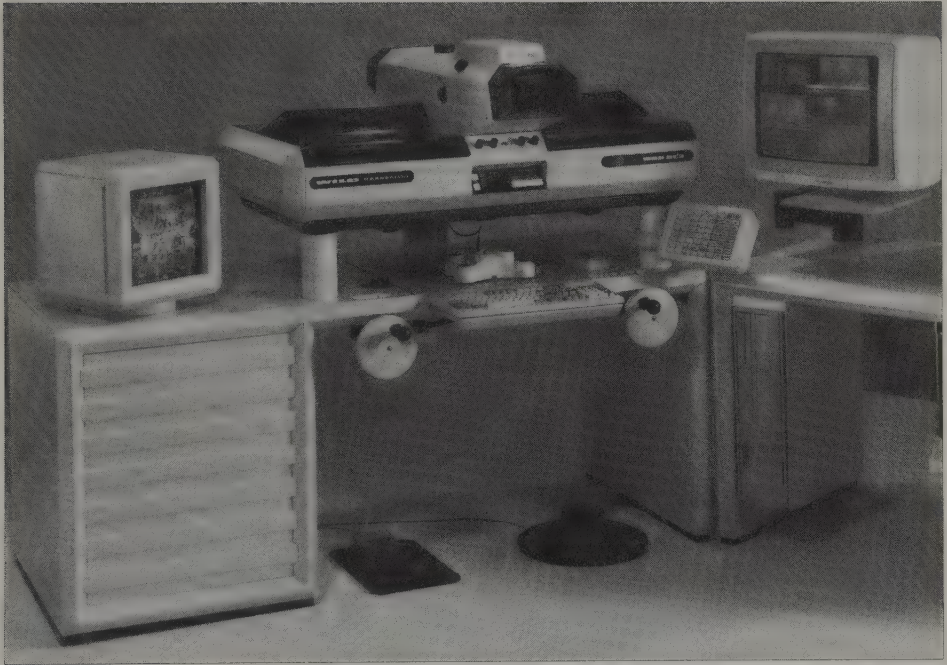
Universelle analytische Auswertegeräte stellen mehrere Firmen her. Im Abschnitt A 4.3.8.3 findet man eine diesbezügliche Zusammenstellung. Bild 5.1-20 zeigt das analytische Auswertegerät BC3 der Fa. Wild/Leitz. Die meisten Geräte gibt es sowohl mit Handrädern als auch mit Freihandführung (Bild 5.1-20). Für die Bildinterpretation ist die Freihandführung vorzuziehen. Geräte für die Bildinterpretation sollten außerdem einen Einblick für zwei Operateure und die Möglichkeit haben, zwei Stereomodelle auf die

Bildträger zu legen und von einem zum anderen Modell kurzzeitig hin- und herspringen zu können (z.B. für den Vergleich der Bilder verschiedenen Datums).

Zu mehreren analytischen Auswertegeräten gibt es auch sogenannte CCD-Kameras (3.2.2 und 3.3). Sie erlauben eine schnelle Digitalisierung kleiner Bildausschnitte. Auf diese Weise kann z.B. die geometrische Auswertung der Stereobilder weitgehend automatisiert werden (siehe Abschnitt 6.10 Korrelation). Auch die anderen Methoden der digitalen Bildverarbeitung können damit in analytische Auswertegeräte integriert werden.

Aufgabe 5.1-9: Mit einem analytischen Zweibildauswertegerät sollen in einer Höhe von 3000 m mit ca. 60% Überdeckung erflogene Luftbilder ausgewertet werden. Wie groß ist die zu erwartende Höhengenaugigkeit ? (Hinweis: Fußnote zu Formel (5.1-4)).

Aufgabe 5.1-10: Man wiederhole die Aufgabe 5.1-9 für 80% überdeckte Luftbilder.



*Bild 5.1-20: Analytisches Auswertegerät BC3 der Fa. Wild/Leitz mit Freihandführung*

### 5.1.4.3 Analogauswertegeräte

Der Lösung der photogrammetrischen Grundaufgaben mit EDV ist eine Lösung mit optisch-mechanischen Geräten vorausgegangen. In den Betrieben trifft man noch in großer Anzahl diese Wunderwerke der Optik und Feinmechanik an. Sie werden in den nächsten Jahren weiter an Bedeutung verlieren.

Bild 5.1-21 zeigt den schematischen Aufbau eines sehr einfachen Analogauswertegerätes. Die Meßbilder werden auf die Bildträger der Projektoren gelegt, die die gleiche innere Orientierung wie die Aufnahmekammer haben müssen. Nach der Orientierung der Projektoren, die im Analogauswertegerät wesentlich langwieriger ist und noch mehr Spezialkenntnisse erfordert als bei den analytischen Auswertegeräten, entsteht ein optisches Geländemodell, das mit der Meßmarke des Tisches in Form der XYZ-Koordinaten ausgemessen werden kann. Der Maßstab des Geländemodelles ergibt sich aus dem Verhältnis der Entfernung der beiden Projektoren zur Entfernung der beiden Aufnahmeorte während des Fluges.

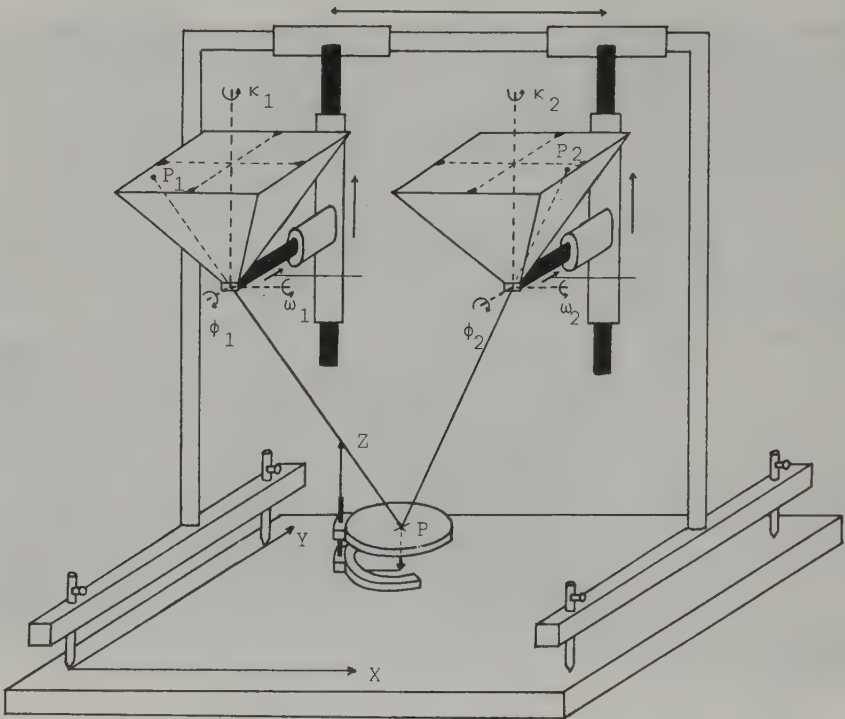


Bild 5.1-21: Schematischer Aufbau eines Analogauswertegerätes

Wie die optischen Probleme bei dieser "Umkehrung" des Aufnahmeproganges gelöst wurden, soll hier nicht erörtert, sondern nur auf die einschlägigen Abschnitte A 4.1.2 und A 4.3.9.1 verwiesen werden. Auch die Lösung mittels mechanischer Lenker, die gegenüber der Lösung mit Projektoren mehrere Vorteile aufweist, soll hier nicht vertieft werden. Ausführliche Beschreibungen dieser Geräte findet man in allen Photogrammetriebüchern, u.a. auch im Abschnitt A 4.3.9.2.



Grundsätzlich können die Analogauswertegeräte genauso wie die analytischen Auswertegeräte für die Erfassung der geometrischen Parameter des Geländes und für thematische Interpretationsaufgaben eingesetzt werden. Auch die Registrierung der Meßergebnisse auf maschinenlesbare Medien wie Magnetbändern usw. ist verwirklicht. Eine Steuerung der Meßmarke durch den Computer ist aber nicht bzw. nur sehr eingeschränkt möglich. Außerdem fehlt in der Regel die gesamte EDV-Unterstützung, die heute die analytischen Auswertegeräte bieten. Daß die Bedienung der Analogauswertegeräte, vor allem die Orientierung, sehr kompliziert ist, wurde bereits erwähnt. Diese Aussage soll mit einer Zahl belegt werden. Die Herstellung der inneren und äußeren Orientierung der beiden Aufnahmen dauert im analytischen Auswertegerät etwa 10 Minuten, im Analogauswertegerät ca. 3 Stunden.

#### 5.1.4.4 Topographische Informationssysteme

Insbesondere mit den analytischen Zweibildauswertegeräten steht nicht mehr die Herstellung einer Karte, sondern die Erfassung des Datenbestandes für ein topographisches Informationssystem im Vordergrund der Überlegungen. Mit den dreidimensionalen Digitizern - so kann man die photogrammetrischen Zweibildauswertegeräte auch bezeichnen - entstehen zunächst digitale Modelle. Sie sind eine Vereinfachung der realen Welt, die durch Idealisierung und Diskretisierung entstehen und für eine systematische Verarbeitung zugänglich gemacht werden. Die digitalen Modelle umfassen zusätzlich zu den gespeicherten Punkten auch

- die Verschlüsselung der Bedeutung der Linien und Punkte,
- die Elemente zur Datenstrukturierung und
- die Algorithmen zum Übergang von den diskreten Punkten auf Kurven und Flächen.

Wird das digitale Modell als Langzeit-Basispeicher konzipiert, so entsteht als nächste Stufe die topographische Datenbank. Die digitalen Modelle sind bei einer solchen Datenbank der zentrale Datenbestand. Auf diesen Datenbestand greifen Verwaltungsprogramme zu, die den zentralen Datenbestand aufbauen, kontrollieren, fortführen und für verschiedene Anwendungsprogramme bereithalten.

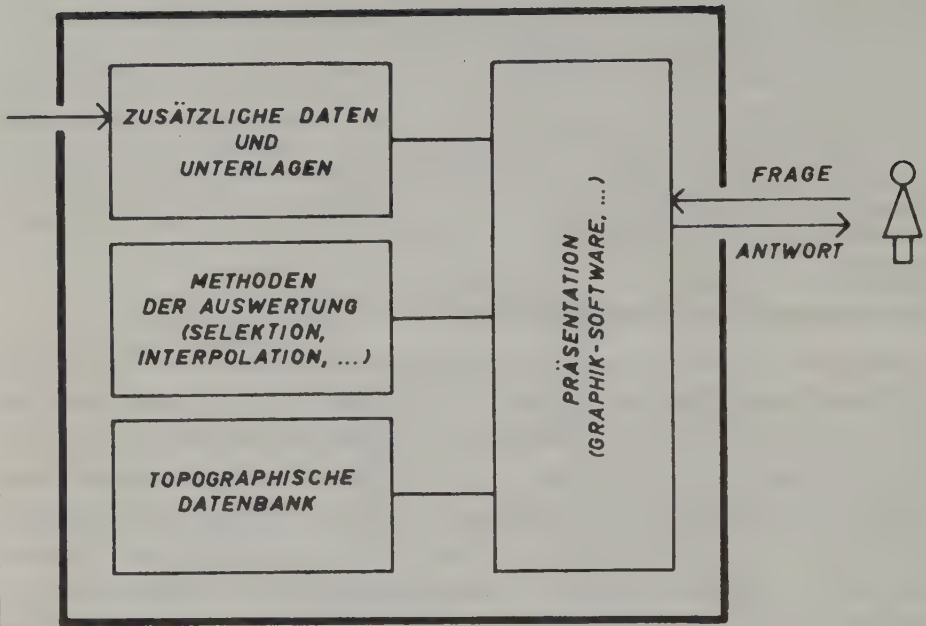


Bild 5.1-22: Topographisches Informationssystem

Für die geometrischen Parameter der Umwelt ist als nächste Stufe das topographische Informationssystem anzusprechen, dessen Herz eine topographische Datenbank ist (Bild 5.1-22). Ein topographisches Informationssystem gibt dem Fragenden die Antworten in der Form von speziellen Karten und Plänen sowie von sonstigen Auswertungen. Innerhalb des topographischen Informationssystems ist eine ausgefeilte Graphiksoftware erforderlich, ebenso müssen verschiedene Methoden der Auswertung (z.B. Selektionen und Interpolationen sowie die Ableitung von Längenschnitten und zentralperspektivischen Bildern aus digitalen Geländemodellen) programmtechnisch verwirklicht sein. Ein Spezifikum der Informationssysteme ist, daß sie zur Beantwortung der an sie herangetragenen Fragen auch auf externe Daten und Unterlagen zurückgreifen können. Soll z.B. eine Kartierung der Gebäude mit einer bebauten Fläche größer als zwei Quadratmeter mit Angabe der Adresse und des Gebäudeeigentümers erfolgen, so wird man über die Adresse, die in einem topographischen Informationssystem in der Regel noch gespeichert sein wird, auf die Grundstücksdatenbank zurückgreifen, in der die Grundeigentümer usw.

zu finden sind. Für andere Fragestellungen werden Verbindungen zu Datenbanken der Hydrologie, Geologie, Bodenkunde, Forstwirtschaft usw. erforderlich sein. Diese Datenbanken und Informationssysteme existieren erst in den Ansätzen. Es ist noch viel interdisziplinäre Arbeit zu leisten.

Am weitesten fortgeschritten sind die topographischen Datenbanken und innerhalb der topographischen Datenbanken die Geländehöhendatenbanken. Der zentrale Datenbestand der Geländehöhendatenbank ist das digitale Geländemodell, das die geometrische Form der Geländeoberfläche beschreibt. Im folgenden sollen daher verschiedene Präsentationen aus einer Geländehöhendatenbank gezeigt werden. Das zugrunde liegende digitale Geländemodell besteht aus Höhen zu den Punkten eines XY-Quadratrasters. Zusätzlich sind mit diesem Raster die Geländekanten, die Mulden- und Kuppenlinien, die markanten Höhenpunkte (dort hat das Gelände eine horizontale Tangentialebene) und die auszusparenden Gebiete (z.B. Gebäudeflächen, Brücken) verknüpft (C 2.5.3). Diese Daten werden langfristig archiviert und gepflegt. Daraus werden Folgeprodukte abgeleitet, deren Daten nur vorübergehend auf den maschinenlesbaren Medien festgehalten werden.

Die folgenden Beispiele stammen aus Arbeiten des Institutes für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien, die gemeinsam mit vielen Partnern angefertigt wurden:

a) Abgeleitete Produkte aus der Geländehöhendatenbank

Da in jedem Rasterpunkt die Geländehöhen in digitaler Form gespeichert sind, können durch (lineare) Interpolation entlang der Rasterlinien jene Punkte gefunden werden, die eine Höhenlinie ( $Z = \text{konstant}$ ) repräsentieren. Die Sequenz der Höhenlinienpunkte wird mit einem digital gesteuerten Zeichentisch ausgegeben (Bild 5.1-23a). (Falls geomorphologisch qualifizierte Höhenlinien gefragt sind, sind bei diesem Interpolationsvorgang auch die Geländekanten etc. zu berücksichtigen. C 3.3).

Aus den Höhen der benachbarten Rasterpunkte kann auch die Flächennormale in jedem Rasterpunkt berechnet werden. (C 2.5.3.3f). Ihre Neigung gegenüber der Lotrechten ist die Geländeneigung bzw. das Gefälle im jeweiligen Rasterpunkt. Aus den Geländeneigungen aller Rasterpunkte lassen sich die Linien gleicher Geländeneigung finden und in Zonen zusammenfassen. Das Bild 5.1-23c zeigt eine solche Gefällsstufenkarte.

Aus den Flächennormalen bekommt man außerdem die Vektoren entlang der Falllinien. Zu diesem Zweck wird die Flächennormale in jedem Rasterpunkt in den Grundriß projiziert und als Vektorfeld graphisch dargestellt (Bild 5.1-23b). Die Matrizen mit den Höhen oder Neigungen können aber auch in Grautönen oder farbkodiert auf einem Bildschirm oder auf photographischem Material ausgegeben werden (6.6.3).

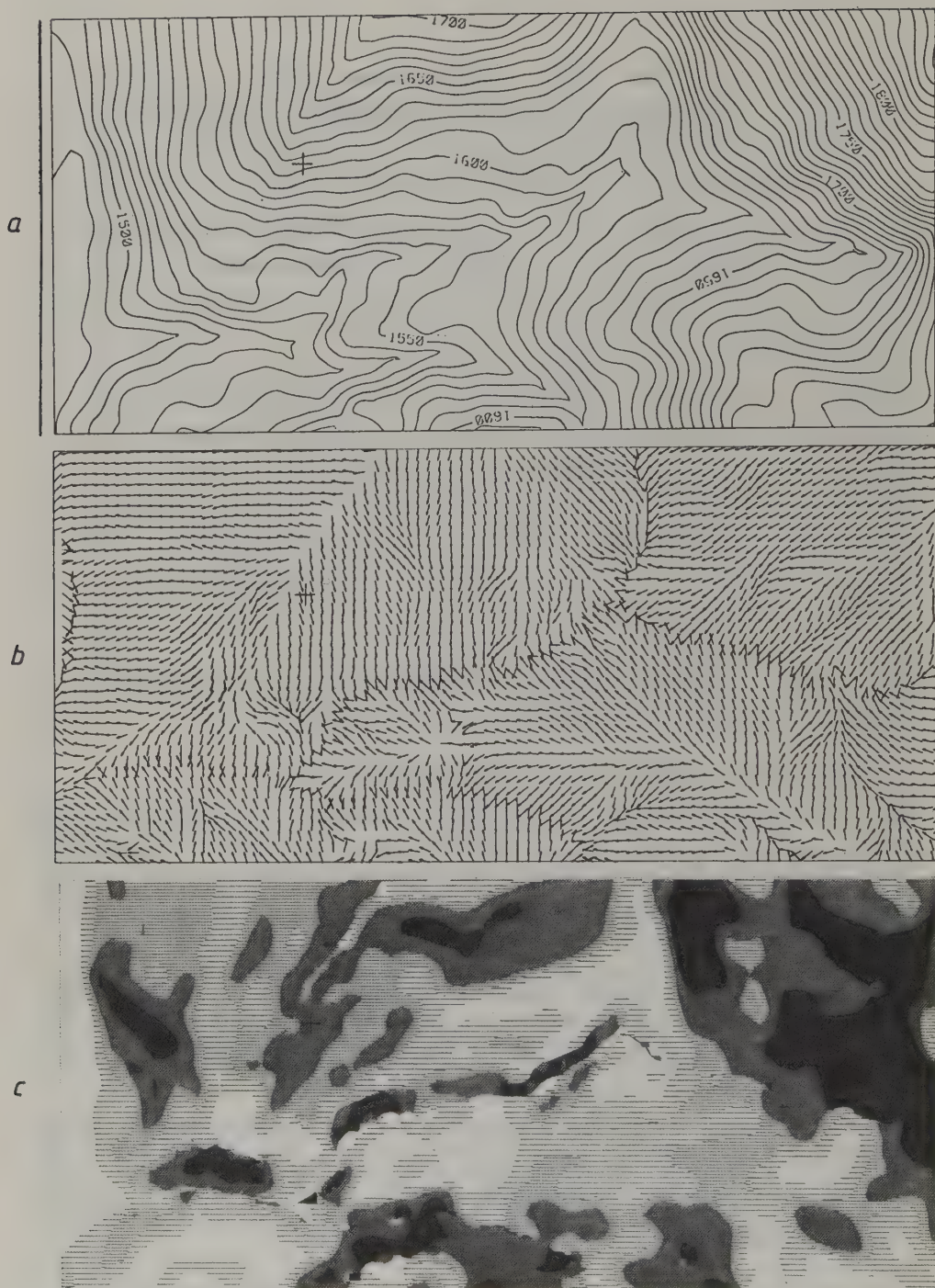


Bild 5.1-23: Aus einem digitalen Geländemodell abgeleitete Höhenlinien (a), Fallinien (b) und Gefällsstufen (c) mit 0-30%, 30-45%, 45-55%, 55-75%, > 75%



Bei der Messung der reflektierten (Sonnen-)Strahlung mit Fernerkundungssensoren steht man heute vor dem Problem, den Einfluß der Geländeform zu eliminieren. Diesen (störenden) Einfluß kann man mit einem digitalen Geländemodell ermitteln: Man nimmt aus einer bestimmten Richtung (= Sonnenstand zu einem bestimmten Zeitpunkt) eine Parallelstrahlung an und multipliziert die angenommene Strahlungsgröße mit dem Cosinus des Winkels zwischen der Strahlrichtung und der Flächennormalen in jedem Rasterpunkt. Das Ergebnis setzt man in Grautöne um (Bild 5.1-24).



*Bild 5.1-24: Simulation der Bestrahlung der Erdoberfläche durch die Sonne. (Details zu den Daten: Siehe Abschnitt f).*

Aus einer Geländehöhendatenbank kann man noch weitere Folgeprodukte ableiten:

- Parallelprojektionen und zentralperspektivische Bilder (siehe b, f und g),
- Geländeprofile entlang von gekrümmten und geradlinigen Grundrißlinien (C 2.5.3.3b),
- Volumenberechnungen gegenüber einer Horizontalebene oder aus den Differenzen zwischen zwei digitalen Geländemodellen, wobei die Oberfläche eines der beiden Geländemodelle umgestaltet wurde (C 2.5.3.3h),
- Orthophotos und Stereoorthophotos (5.1.5).

#### b) Die Flurplanung Gneixendorf

Als erstes Anwendungsbeispiel moderner Methoden der Photogrammetrie und Fernerkundung soll die von der Niederösterreichischen Agrarbezirksbehörde

bearbeitete Flurplanung Gneixendorf besprochen werden. Es handelt sich um die in Löß eingearbeiteten Weinbergterrassen in der Wachau. Diese einmalige Kulturlandschaft ist gefährdet: Einerseits werden immer mehr Parzellen wegen fehlender Infrastruktur (Zufahrten etc.) nicht mehr genutzt und andererseits schwemmen starke Niederschläge den Löß ab. Für eine Neugestaltung der Landschaft (z.B. geringfügige Neigung der Terrassen zum Hang) war die Dokumentation der Bewirtschaftungsintensität und eine sehr genaue Erfassung der Geländeoberfläche erforderlich. Außerdem waren Unterlagen zu liefern, um die Beteiligten über die beabsichtigten Maßnahmen genau zu informieren.

Es wurden Farbinfrarotaufnahmen mit einer Weitwinkel-Kamera im Maßstab 1:5000 erfolgt. Daraus wurde ein digitales Geländemodell (10 m Maschenweite) mit einer Höhengenaugigkeit von  $\pm 10$  cm erstellt. Dieses Geländemodell war die Basis zur Ableitung von Höhenlinienkarten im Maßstab 1:1000 und von Geländeprofilen. Die Höhenlinienkarten wurden zusätzlich als Deckfolien für die Stereoorthophotos 1:2000 (5.1.5) angefertigt. Von diesem digitalen Geländemodell wurden auch zentralperspektivische Bilder hergestellt (Bild 5.1-25). Darin sieht man sehr gut den terrassenförmigen Aufbau des Geländes, allerdings nur deshalb, weil dieses Geländemodell kein reines Rastermodell ist, sondern zusätzlich die Geländekanten enthält.

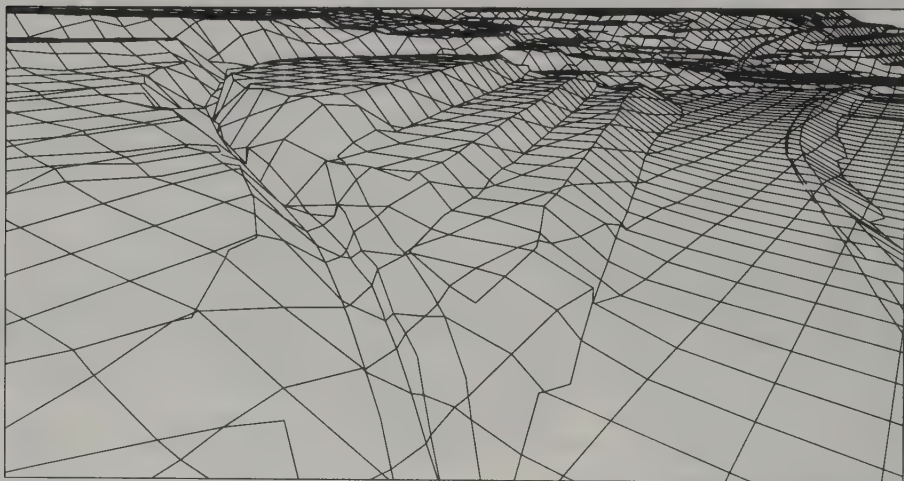


Bild 5.1-25: Zentralperspektivisches Bild eines digitalen Geländemodells von den Weinbergterrassen in der Wachau

Mit Hilfe der Geländeprofile und der Farbinfrarot-Stereoorthophotos wurde - unter Respektierung der wichtigsten Landschaftselemente - eine neue Terrassenlandschaft geplant und in das digitale Geländemodell eingearbeitet. Die abschließende Kontrolle bildeten photographische Hubschrauber-Schrägaufnahmen, in die das neue digitale Geländemodell abgebildet und mit Retuschen die neue Landschaft naturalistisch gestaltet wurde. Solche Photomontagen sind ein gutes Hilfsmittel für eine bürgernahe Planung (weitere Details zu diesem Projekt findet man bei Hochstöger (1989)).

#### c) Die Neigungszonierung der Weinbauparzellen in der Steiermark

Ein Beispiel für eine landesweite Erhebung ist die vor kurzem abgeschlossene Neigungszonierung der Weinbauparzellen in der Steiermark, Österreich.

Aus photographischen Schwarzweiß-Meßbildern wurde ein digitales Geländemodell mit einer Rasterweite von 10 m aufgebaut. Daraus wurden die Gefällsstufenkarten abgeleitet und mit der Katasterkarte kombiniert (Bild 5.1-26). Auf der Grundlage dieser Karte kann die Steiermärkische Landwirtschaftskammer, die das Projekt finanziell getragen hat, die Entscheidungen für eine optimale Nutzung und Bewirtschaftung der Weinbauparzellen treffen (z.B. ist eine maschinelle Bewirtschaftung nur bis 25% Geländeneigung möglich).



Bild 5.1-26: Gefällsstufenkarte kombiniert mit der Katasterkarte  
(Datenerfassung: Ingenieurbüro Legat, Leibnitz)



#### d) Bodenenerosionsgefährdungskarte Schletz

Die landwirtschaftlich genutzten Böden sind u.a. durch eine zu intensive Bewirtschaftung (z.B. mit Mais) und durch das Anlegen zu großer Ackerlängen bzw. Hanglängen bei der Neugestaltung der Fluren gefährdet. Die Bodenerosion hängt u.a. von der Geländeneigung, der Bodenart, der Bewirtschaftungsrichtung, der Hanglänge und dem Niederschlag ab. Als Entscheidungsgrundlage für die Neugestaltung der Fluren werden Erosionsgefährdungskarten in Zukunft unerlässlich sein. Bild 5.1-27 zeigt eine solche Bodenenerosionsgefährdungskarte. (Ihre Entstehung ist in Ehgartner et al. (1988) beschrieben.) Sie zeigt die erlaubten Hanglängen, für die die Bodenerosion noch toleriert werden kann.

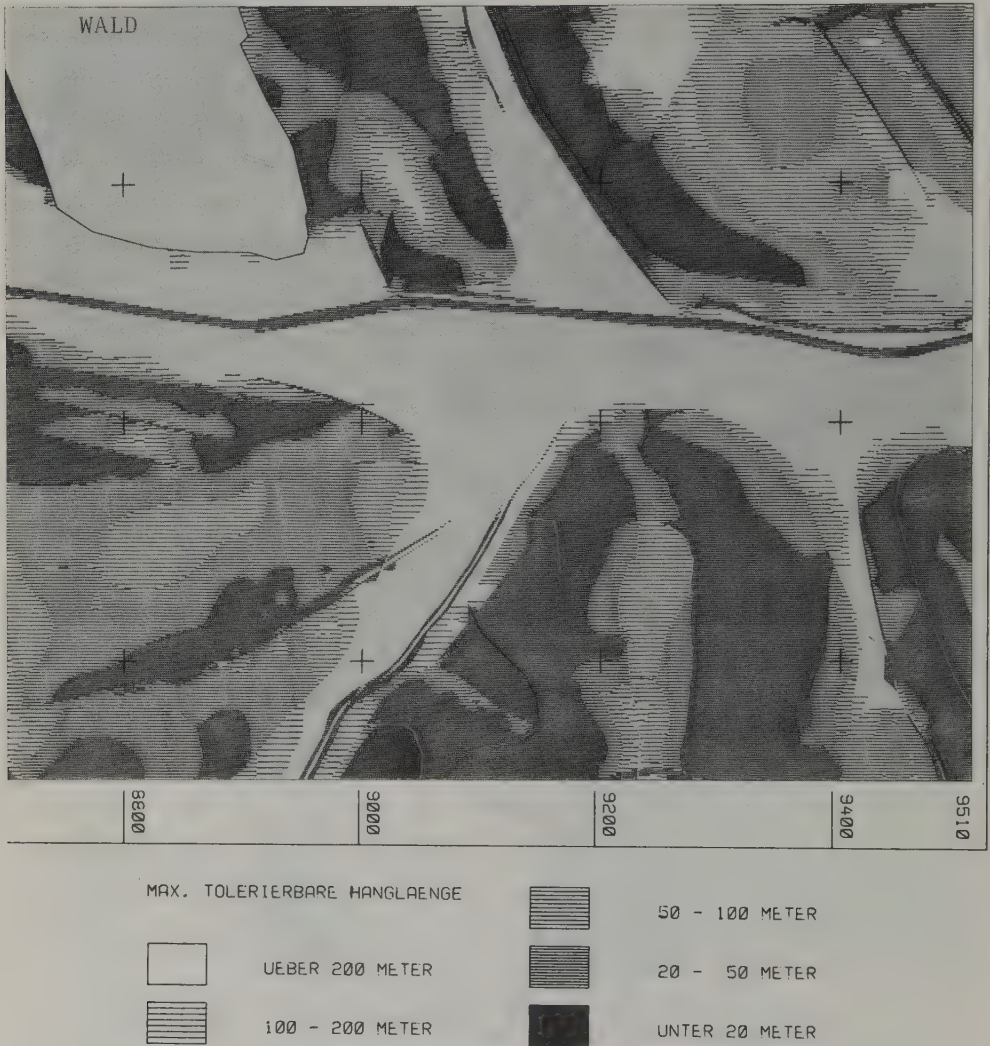
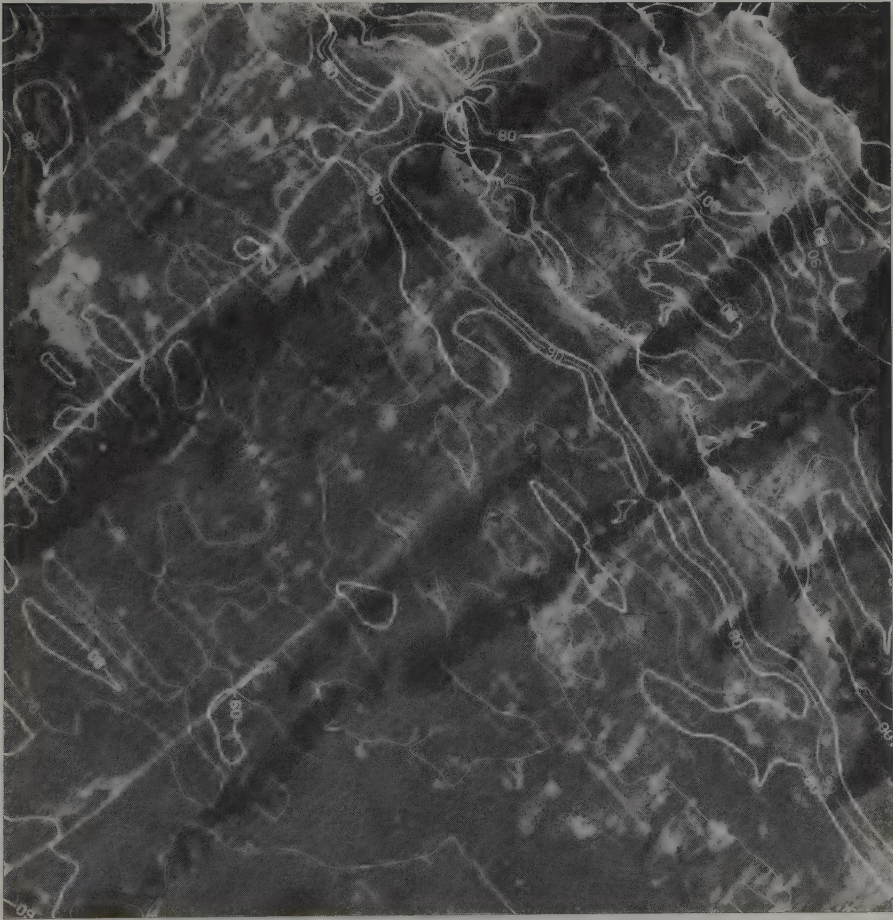


Bild 5.1-27: Bodenenerosionsgefährdungskarte für fünf Hanglängenstufen



e) Überwachung der Vegetationsdecke der Almen

Dieses Beispiel wird hier angeführt, um den Wert alter Luftaufnahmen für die Umweltdokumentation herauszustellen. Das Institut für Geographie der Universität Salzburg hat das Problem untersucht, wie sich die Vegetationsdecke in der Osterhorngruppe, Bundesland Salzburg, in den letzten Jahrzehnten verändert hat. Meßbilder aus den Jahren 1953, 1965 und 1977, die im Luftbildarchiv des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen gelagert sind, geben darüber objektive Auskunft. Um den Vergleich der Photographien verschiedener Jahrgänge und eine genaue Quantifizierung durchführen zu können, wurden von allen Luftbildern Stereoorthophotos 1:2500 (5.1.5) hergestellt. Zur leichteren Analyse der Vegetationsschäden hat man zusätzlich noch Höhenlinienkarten und Gefällsstufenkarten aus dem digitalen Geländemodell abgeleitet. Bild 5.1-28 zeigt für einen kleinen Ausschnitt das Orthophoto mit den Linien gleicher Geländeneigung.



*Bild 5.1-28: Orthophoto und Linien gleicher Geländeneigung*

f) Überprüfung des Flächenwidmungsplanes in Mallnitz

In einer Zeit euphorischen Wachstums haben manche Gemeinden in ihren Flächenwidmungsplänen zuviel Bauland ausgewiesen, im Gebirge vor allem auch in Bereichen mit geringer Sonnenscheindauer. Um diese Bereiche mit hohem Energieverbrauch für die Heizung herauszufinden, hat man in der Umgebung von Mallnitz ein digitales Geländemodell erstellt und daraus einerseits für mehrere Zeitpunkte im Jahr die Beschattung ermittelt und andererseits für das gesamte Jahr die eingestrahlte Sonnenenergie - unter der Annahme wolkenlosen Himmels - aufsummiert. Solche objektive Angaben erleichtern die schwierigen Entscheidungen auf Gemeindeebene.

Dieses digitale Geländemodell ist aus jenen Daten abgeleitet, die im Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen inzwischen für ganz Österreich vorliegen und in der Geländehöhendatenbank gespeichert sind. Die Dichte dieser Daten beträgt - abhängig von der Geländeform - zwischen 30 m und 120 m. Diese Daten wurden aus photographischen Meßbildern im Maßstab 1:30000 gewonnen.

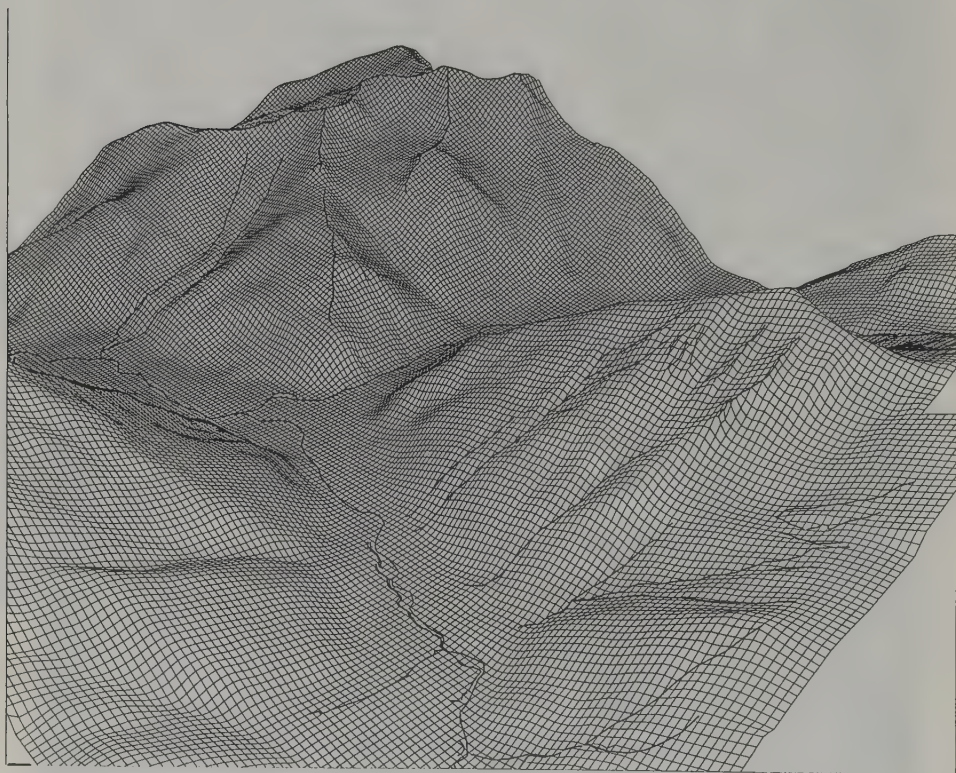


Bild 5.1-29: Zentralperspektive des digitalen Geländemodelles Mallnitz (flächenhafte Daten: Geländehöhendatenbank des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen; Geländekanten: Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien)



#### g) Ableitung von Sichtbarkeitskarten

Vor allem für Fragestellungen in der Raumplanung interessiert man sich für sogenannte Sichtbarkeitskarten (visibility maps). Sie geben an, welche Geländebereiche von einem bestimmten Standpunkt aus sichtbar und welche Bereiche unsichtbar sind. Mit dem digitalen Geländemodell können solche Sichtbarkeitskarten elegant hergestellt werden. Man fertigt von dem ausgewählten Standpunkt Zentralperspektiven an, die über den ganzen Horizont verteilt sind. Bild 5.1-30 zeigt eine solche Zentralperspektive vom Hochgall in östlicher Richtung. Die Zentralperspektive gibt an, welche Rasterpunkte vom jeweiligen Standpunkt aus sichtbar und welche Rasterpunkte verdeckt sind. Mit Hilfe der Zentralperspektiven über den gesamten Horizont kann deshalb auch eine Karte der einsehbaren Gebiete ausgegeben werden (Bild 5.1-31).

Das Geländemodell, das diesem Beispiel zugrunde liegt, hat eine Rasterweite von 250 m und eine Höhengengenauigkeit zwischen  $\pm 25$  m und  $\pm 60$  m, abhängig von der Geländeneigung. Dieses (Übersichts-)Geländemodell existiert am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien und ist für überregionale Fragestellungen sehr nützlich. Es wurde bisher für hydrologische Fragestellungen, für die Energie- und Rohstoffforschung, für meteorologische Modelle im Rahmen des Waldsterbens und für pflanzensoziologische Fragestellungen benutzt. Nachdem diese Informationen vom gesamten Bundesgebiet auf einem digitalen Speicher mit direktem Zugriff vorhanden sind, wird mit diesen Daten auch die naturräumliche Gliederung ausgewertet, z.B. die mittlere Geländehöhe und mittlere Geländeneigung der einzelnen Bundesländer, Gemeinden oder anderer Interessensgebiete.

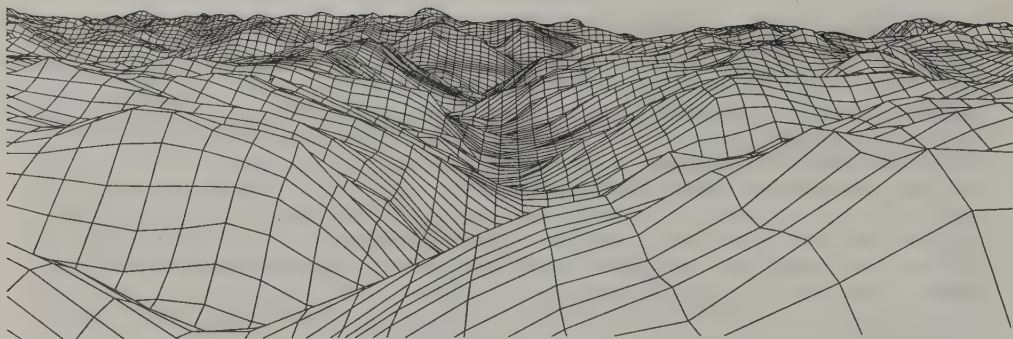


Bild 5.1-30: Zentralperspektive vom Hochgall in östlicher Richtung

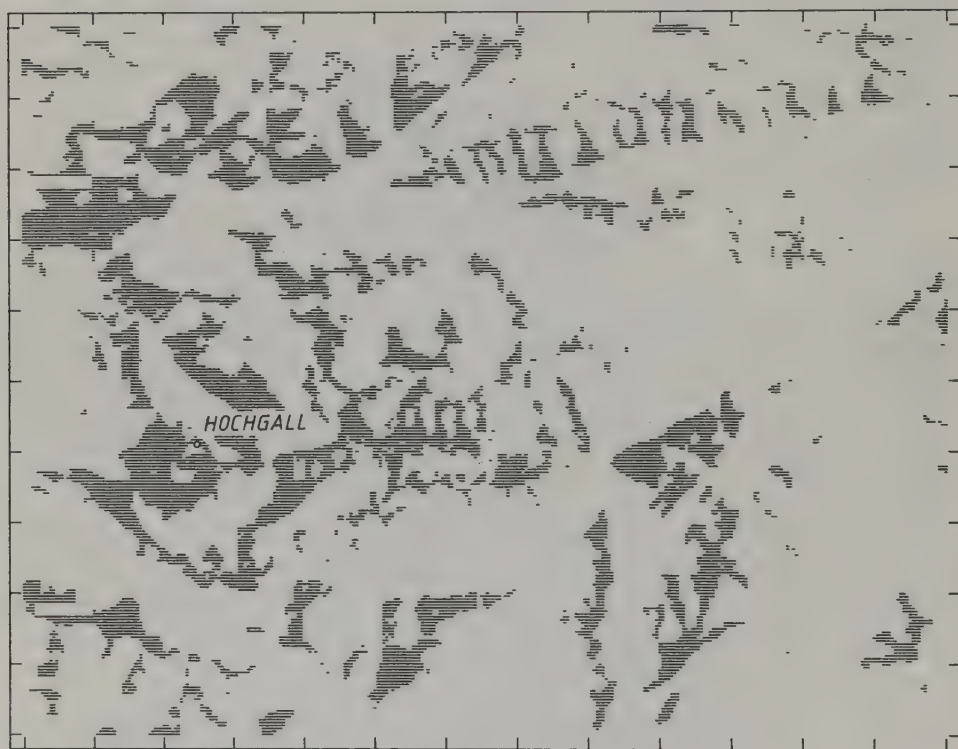


Bild 5.1-31: Einsehbare Gebiete vom Standpunkt Hochgall (die einsehbaren Gebiete sind schraffiert)



### 5.1.5 Orthophotos und Stereoorthophotos

Für viele Aufgabenstellungen ist das Orthophoto die beste Arbeitsgrundlage. Das Orthophoto hat den Inhalt des Weltraum- oder Luftbildes und die geometrischen Eigenschaften einer Karte; es ist also ein (geometrisch) "richtiges Photo" mit einem einheitlichen Maßstab. Solche Orthophotos eignen sich besonders gut für (visuelle) Interpretationsaufgaben: Der Anwender (Archäologe, Bodenkundler, Forst- und Landwirt, Geograph, Geologe, Raumplaner und Ökologe) bekommt die gesamte Informationsfülle eines photographischen Bildes für seine Interpretationsaufgabe, und seine Interpretationsergebnisse fallen im Maßstab des Orthophotos an. Der für die Interpretation wichtige Stereoeffekt kann mittels eines Stereopartners zum Orthophoto geliefert werden. Orthophoto und Stereopartner nennt man Stereoorthophoto.

Die Stereoorthophototechnik liefert eine klare Trennung zwischen Photogrammetrie und visueller Interpretation. Die Herstellung der Stereoorthophotos ist eine rein technische Aufgabe, die in der Regel der Photogrammeter wahrnimmt. Die Interpretation des Inhaltes des Stereoorthophotos führt der mit dem Wissen für die jeweilige Problemstellung vertraute Fachmann aus, ohne sich die technisch komplizierten photogrammetrischen Auswerteverfahren aneignen zu müssen. Andererseits muß sich der mit den technischen Problemstellungen vertraute Photogrammeter nicht in das Wissensgebiet der Interpretationsaufgabe einarbeiten.

Gegen die Stereoorthophototechnik sind die Kosten ihrer Herstellung einzuwenden. Die visuelle Interpretation mit analytischen Zweibildauswertegeräten (5.1.4.2) ist aber noch teurer. Die anderen, billigeren Auswerteverfahren können nur als Behelfslösung angesprochen werden. Außerdem ist noch zu erwähnen, daß die Orthophotos, insbesondere wenn sie zu Luftbildkarten ausgestaltet werden, mehreren Disziplinen gute Dienste leisten können, sodaß sich die Kosten auf mehrere Projekte verteilen. Ein weiteres Argument gegen die Stereoorthophotographie besteht darin, daß durch die photographische Umbildung vom Meßbild zum Stereoorthophoto Informationen verlorengehen. Bei der Verwendung guter Geräte und guter Filme kann dieser Informationsverlust aber in Grenzen gehalten werden.

Im Abschnitt 5.1.2 haben wir bereits die Herstellung der Orthophotos aus Luftbildern kennengelernt, und zwar unter der Voraussetzung ebenen Geländes. Im kommenden Abschnitt (5.1.5.1) besprechen wir die Herstellung der Orthophotos und Stereopartner kupierten Geländes. Dabei unterstellen wir

zunächst, daß mit einer Meßaufnahme ein verhältnismäßig kleinräumiges Gebiet - aus der Luft - erfaßt wird. Anschließend wird die Orthophoto- und Stereoorthophotoherstellung großräumiger Gebiete, insbesondere aus Satellitenaufnahmen, besprochen.

#### 5.1.5.1 Orthophotos und Stereoorthophotos aus Luftaufnahmen

Die Herstellung eines Orthophotos aus einem Meßbild läuft darauf hinaus, daß man die Verzerrungen des zentralperspektivischen Meßbildes, die von Geländehöhenunterschieden und von Bildneigungen herrühren, beseitigt. Die Verzerrungen des Meßbildes können anhand des Bildes 5.1-33 (links) gut beschrieben werden. Die Geländeoberfläche sei durch ein digitales Geländemodell auf Rasterbasis gegeben, wie es in analytischen Zweibildauswertegeräten direkt gemessen (5.1.4.2) oder mit topographischen Informationssystemen durch Interpolation gewonnen werden kann (5.1.4.4). Bei einer Karte wird das Gelände orthogonal in die Grundrißebene projiziert, d.h. das Quadratnetz in der XY-Ebene ist dem Orthophoto zuzuordnen. Die Übertragung dieses Quadratnetzes in das Meßbild liefert einen deformierten Raster, dessen Deformationen die Verzerrungen des Meßbildes wiedergeben. Der deformierte Raster im Meßbild entsteht rechnerisch dadurch, daß man

- die äußeren Orientierungselemente des Meßbildes durch räumlichen Rückwärtsschnitt (5.1-8) aus Paßpunkten oder einer Phototriangulation (5.1.6) bestimmt und
- dann mittels der Gleichungen (5.1-5) die Rasterpunkte mit ihren XYZ-Koordinaten in das Bild transformiert.

Das Ergebnis sind die xy-Koordinaten des deformierten Rasters.

Das Instrumentarium der modernen Orthophototechnik (A 6.3.1) bietet die Möglichkeit, mit Hilfe der xy-Koordinaten des deformierten Rasters aus dem Meßbild ein Orthophoto zu erzeugen. Zu diesem Zweck wird ein Rasterelement nach dem anderen photographisch umgebildet und während dieser Umbildung die Optik so gesteuert, daß aus einem deformierten Rasterelement ein quadratisches Element entsteht. Die gesamte Steuerung des komplizierten Vorganges übernimmt ein Prozeßrechner. Die Methode wird als digital gesteuerte Differentialumbildung bezeichnet.

Mit der digital gesteuerten Differentialumbildung kann man aber aus einem zentralperspektivischen Meßbild nicht nur eine Orthogonalprojektion, sondern auch eine schräge Parallelprojektion erzeugen (Bild 5.1-33 rechts). Die einzelnen Schritte zur Herstellung eines photographischen Bildes mit

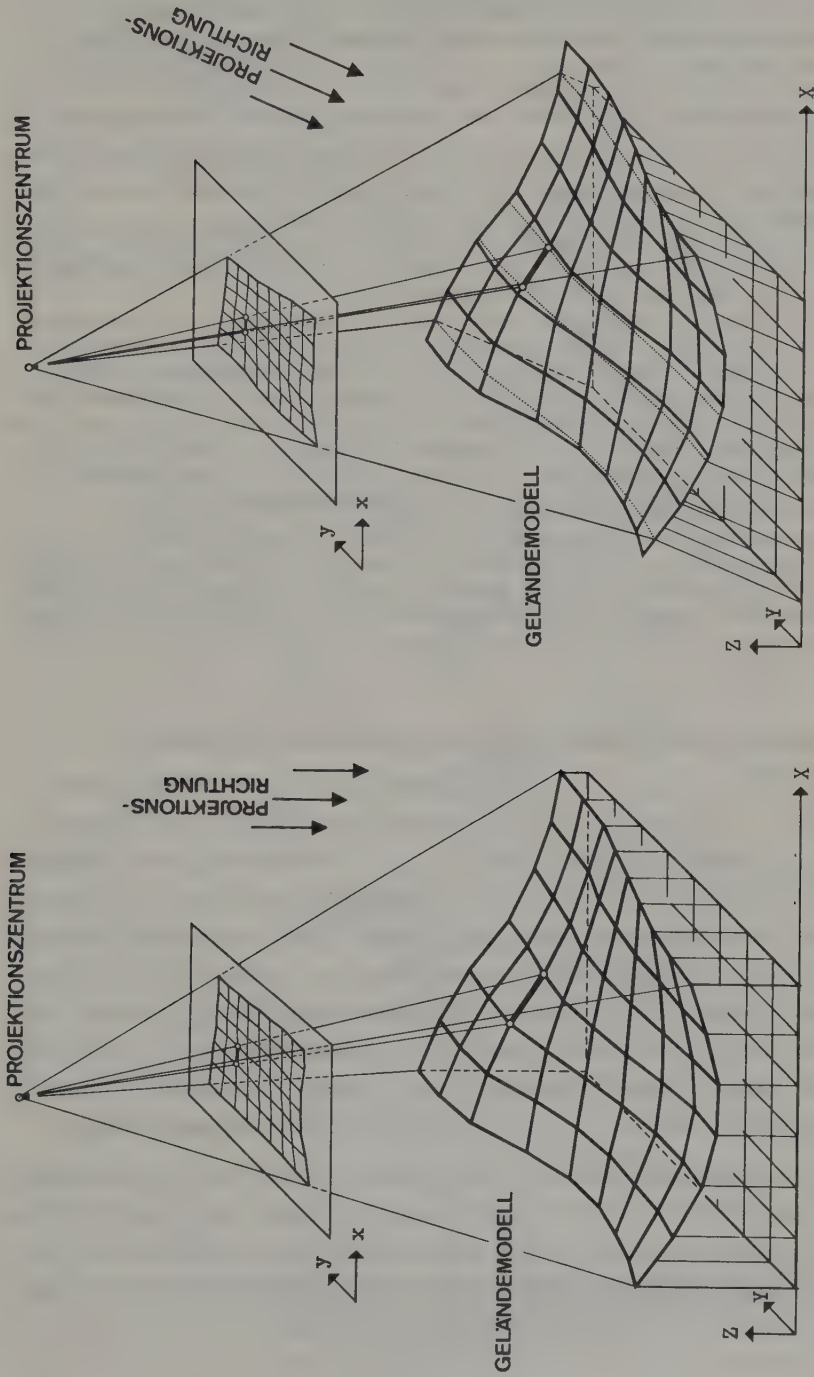


Bild 5.1-33: Zusammenhang zwischen Meßbild, Geländemodell sowie Orthophoto (links) und Stereopartner (rechts)

dieser Eigenschaft sind:

- Rechnerische Ausbreitung eines Quadratrasters in der XY-Ebene.
- Rechnerische Projektion des Quadratrasters entlang der schrägen Projektionsstrahlen auf die Oberfläche des Geländemodelles. (Man beachte, daß dafür das gleiche Geländemodell wie für die Orthophotoherstellung benutzt wird und dabei Schnittpunkte auf den Verbindungsgeraden in den X-Profilen entstehen. Die Projektionsrichtung verläuft nämlich parallel zur XZ-Ebene.)
- Transformation dieser Schnittpunkte mit ihren XYZ-Koordinaten in das Meßbild mittels der Beziehungen (5.1-5), wobei die Elemente der äußeren Orientierung wiederum vorher ermittelt werden müssen.
- Das digital gesteuerte Differentialumbildegerät erzeugt aus dem Meßbild mittels der xy-Koordinaten des deformierten Rasters ein neues photographisches Bild, das dem XY-Quadratraster entspricht.

In diesem Fall ist das umgebildete Produkt eine schräge Parallelprojektion. Sie unterscheidet sich von der Orthogonalprojektion dadurch, daß in X-Richtung Parallaxen - linear abhängig von den Geländehöhenunterschieden - auftreten und es senkrecht dazu, also in Y-Richtung, keine Parallaxen gibt. Damit liegen ideale Voraussetzungen für die Stereoskopie (5.1.3) vor: Das gesamte Stereomodell ist frei von störenden Parallaxen senkrecht zur Betrachtungsbasis. Die schräge Parallelprojektion wird als Stereopartner bezeichnet. Orthophoto und Stereopartner nennt man Stereoorthophoto.

Adäquate Geräte für die Auswertung der großformatigen Stereoorthophotos, Fragen der Genauigkeit der Stereoorthophotos und der zweckmäßigsten Projektion für den Stereopartner sowie Anwendungen der Stereoorthophotographie sind im Abschnitt D ausführlich beschrieben. Im folgenden Abschnitt soll die Stereoorthophoto-Herstellung großräumiger Bereiche näher angesprochen werden.

#### 5.1.5.2 Orthophotos und Stereoorthophotos aus Satellitenaufnahmen

Es erhebt sich die Frage, warum die Flughöhe, in der die Meßaufnahmen erfolgen werden, eine unterschiedliche Verfahrensweise der photogrammetrischen Auswertetechnik nach sich ziehen soll. Die Beantwortung der aufgeworfenen Frage hängt mit der Gültigkeit der mathematischen Formeln zusammen, auf die sich die Orthophotoherstellung gründet. Die wesentlichen Formeln (5.1-5) setzen Landeskoordinaten in einem räumlichen cartesischen XYZ-Koordinatensystem voraus (Bild 5.1-14). Die Landeskoordinaten genügen aber - wie am Ende des Abschnittes 5.1.4.1 bereits ausgeführt wurde - nur innerhalb kleiner Gebiete dieser Voraussetzung; innerhalb großräumiger Gebiete haben die Landeskoordinaten kompliziertere mathematische Eigenschaften.

Da sich ein photogrammetrisches Projekt - wie z.B. die Orthophotoherstellung - auf Paßpunkte im Landeskoordinatensystem stützt, soll zunächst die Umwandlung der ursprünglichen  $Y_L X_L Z_L$ -Landeskoordinaten in  $xyz$ -Koordinaten, die für die Photogrammetrie tauglich sind, besprochen werden. Die ange-deutete Umwandlung wird in drei Schritten durchgeführt:



a) Umrechnung der  $Y_L X_L$ -Landeskoordinaten, die in der Regel in Gauß-Krüger-Koordinaten gegeben sind, in geographische Koordinaten  $\phi$  und  $\lambda$ , wobei das der jeweiligen Landesvermessung zugrundeliegende Erdellipsoid zu benutzen ist. Man beachte, daß die  $Y_L$ -Achse in der Regel nach Osten und die  $X_L$ -Achse in der Regel nach Norden verläuft. (Die einschlägigen Formeln findet man in Lehrbüchern der Landesvermessung und Geodäsie, z.B. Heitz, 1985.) Die Geländehöhe  $H$ , die sich eigentlich auf das Geoid bezieht, wird von dieser Umrechnung nicht berührt, d.h. ein Punkt  $P_i$  ist mit den Koordinaten  $\phi_i, \lambda_i, H_i$  festgelegt (Bild 5.1-34).

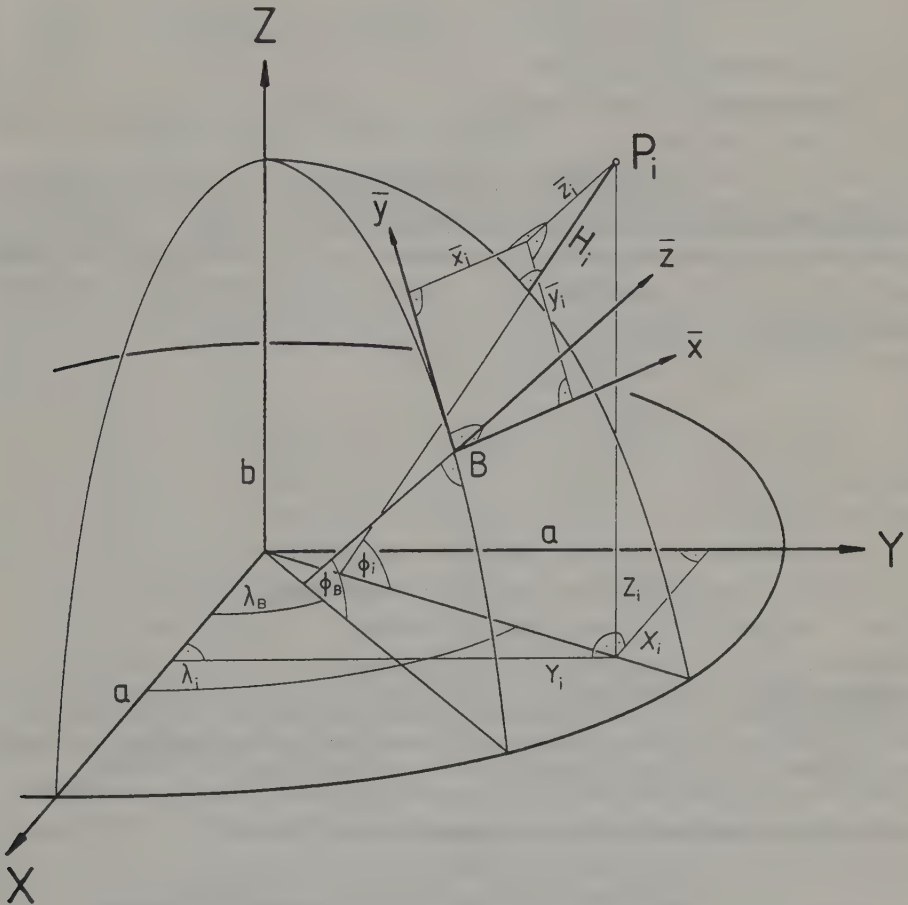


Bild 5.1-34:  $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ -Tangentialsystem, geozentrisches Koordinatensystem  $X, Y$  und  $Z$ , geographische Koordinaten  $\phi$  und  $\lambda$  sowie Ellipsoidhöhe  $H$

b) Umwandlung der geographischen Koordinaten  $\phi$  und  $\lambda$  sowie der Ellipsoidhöhe  $H$  in das dreidimensionale geozentrische XYZ-System (Bild 5.1-34) mit den Formeln:

$$\begin{aligned} X &= \left( \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} + H \right) \cos \phi \cdot \cos \lambda \\ Y &= \left( \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} + H \right) \cos \phi \cdot \sin \lambda \\ Z &= \left( \frac{a(1 - e^2)}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} + H \right) \sin \phi \end{aligned} \quad (5.1-13)$$

$a \hat{=}$  große Ellipsoidhalbachse

$b \hat{=}$  kleine Ellipsoidhalbachse

$$e^2 = (a^2 - b^2)/a^2$$

c) Umwandlung der geozentrischen XYZ-Koordinaten in ein dreidimensionales cartesisches xyz-Koordinatensystem, dessen  $\overline{xy}$ -Ebene im Punkt B, der etwa in der Mitte des Interessensgebietes angenommen wird, das Erdellipsoid berührt (Bild 5.1-34). Die Koordinaten  $\overline{x}_i$ ,  $\overline{y}_i$  und  $\overline{z}_i$  eines Punktes  $P_i$  lauten in diesem Tangentialsystem:

$$\begin{pmatrix} \overline{x}_i \\ \overline{y}_i \\ \overline{z}_i \end{pmatrix} = \underline{R}^T \begin{pmatrix} X_i - X_B \\ Y_i - Y_B \\ Z_i - Z_B \end{pmatrix} \quad (5.1-14)$$

wobei:

$$\underline{R} = \begin{pmatrix} -\sin \lambda_B & -\sin \phi_B \cdot \cos \lambda_B & \cos \phi_B \cdot \cos \lambda_B \\ \cos \lambda_B & -\sin \phi_B \cdot \sin \lambda_B & \cos \phi_B \cdot \sin \lambda_B \\ 0 & \cos \phi_B & \sin \phi_B \end{pmatrix}$$

Zahlenbeispiel: Im Bezugspunkt B ( $48^\circ$  n.Br.,  $14^\circ$  ö.L. von Gr.) soll ein Tangentialsystem an das internationale Ellipsoid ( $a = 6378388$ ,  $b = 6356912$  m) für die photogrammetrische Auswertung gelegt werden. Von einem der Paßpunkte  $P_1$  sind folgende Werte bekannt:  $\phi_1 = 47^\circ 48' 15''$ ,  $\lambda_1 = 13^\circ 42' 02''$ ,  $H_1 = 1852$  m.

Geozentrische Koordinaten für den Bezugspunkt B (5.1-13):

$$\begin{aligned} \sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \phi} &= \sqrt{1 - 0.00672267 \cdot 0.55226423} = 0.99814193 \\ X_B &= (6378338/0.99814193) \cdot 0.66913061 \cdot 0.97029572 = 4148906.5 \text{ m} \\ Y_B &= (6378338/0.99814193) \cdot 0.66913061 \cdot 0.24192190 = 1034438.6 \text{ m} \\ Z_B &= (6335508/0.99814193) \cdot 0.74314483 = 4716964.4 \text{ m} \end{aligned}$$

Geozentrische Koordinaten für den Paßpunkt  $P_1$ , wobei in (5.1-13) die Ellipsoidhöhe  $H$  eingeht:

$$\begin{aligned} X_1 &= (6390188+1852) \cdot 0.67166671 \cdot 0.97154682 = 4171162.0 \text{ m} \\ Y_1 &= (6390188+1852) \cdot 0.67166671 \cdot 0.23684757 = 1016862.5 \text{ m} \\ Z_1 &= (6347229+1852) \cdot 0.74085344 = 4703738.7 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{Drehmatrix } \underline{R} = \begin{pmatrix} -0.24192190 & -0.72107024 & 0.64925457 \\ 0.97029573 & -0.17978300 & 0.16187734 \\ 0 & 0.66913061 & 0.74314483 \end{pmatrix}$$

xyz-Koordinaten im dreidimensionalen cartesischen Koordinatensystem des Punktes  $P_1$ :

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{y}_1 \\ \bar{z}_1 \end{pmatrix} = \underline{R}^T \begin{pmatrix} 4171162.0 - 4148906.5 \\ 1016862.5 - 1034438.6 \\ 4703738.7 - 4716964.4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -22438.0 \text{ m} \\ -21737.7 \text{ m} \\ 1775.71 \text{ m} \end{pmatrix}$$

Hätte man die Erde als Kugel mit dem Radius 6370 km angenommen ( $e = 0$ ), würden die entsprechenden Koordinaten lauten:

$$\bar{x}_1 = -22367.1 \text{ m} \quad \bar{y}_1 = -21735.1 \text{ m} \quad \bar{z}_1 = 1775.67 \text{ m}$$

Den Unterschied zwischen der  $\bar{z}_1$ -Koordinate und der Ellipsoid- bzw. Kugelhöhe  $H$  kann man übrigens mit der Näherungsformel  $\Delta H \approx s^2/(2R)$  ermitteln ( $s \hat{=}$  Entfernung des Punktes vom Bezugspunkt  $B$ ,  $R \hat{=}$  Erdradius), d.h.  $\Delta H \approx (31.2)^2/(2 \cdot 6370) = 0.076 \text{ km} \hat{=} 76 \text{ m}$ .

Aufgabe 5.1-11: Man wiederhole das Zahlenbeispiel mit dem bei den meisten Landeskartenwerken Europas verwendeten Bessel ellipsoid ( $a = 6377397 \text{ m}$ ,  $b = 6356079 \text{ m}$ ) und vergleiche das Ergebnis kritisch mit dem Ergebnis des internationalen Erdellipsoides.

Nach der Bereitstellung der Paßpunkte im  $\overline{\text{xyz}}$ -Tangentialsystem kann z.B. eine Auswertung mit einem analytischen Zweibildauswertegerät erfolgen. Die dabei ausgewerteten Punkte fallen natürlich ebenfalls im  $\overline{\text{xyz}}$ -Tangentialsystem an. Von diesen Punkten interessieren uns aber die Landeskoordinaten. Der erforderliche Rechengang beginnt mit der zu (5.1-14) inversen Beziehung und wird mit der zu (5.1-13) inversen Beziehung, die allerdings nur iterativ gelöst werden kann, fortgesetzt. Der letzte Schritt ist die Umwandlung der geographischen Koordinaten in Landeskoordinaten, in der Regel in Gauß-Krüger-Koordinaten.

Im Anschluß an diese Vorüberlegungen kann die Orthophotoherstellung weiträumiger Gebiete erläutert werden. Nachdem das Orthophoto im Landeskoordinatensystem, also in der Koordinatenebene der Gauß-Krüger-Projektion, entstehen soll, ist der Quadratraster in der  $Y_L X_L$ -Ebene auszubreiten (① im Bild 5.1-35). Für diese Rasterpunkte benötigt man die Geländehöhen  $H$  bzw.  $Z_L$ , die in der Regel durch Interpolation im digitalen Geländemodell entstehen.

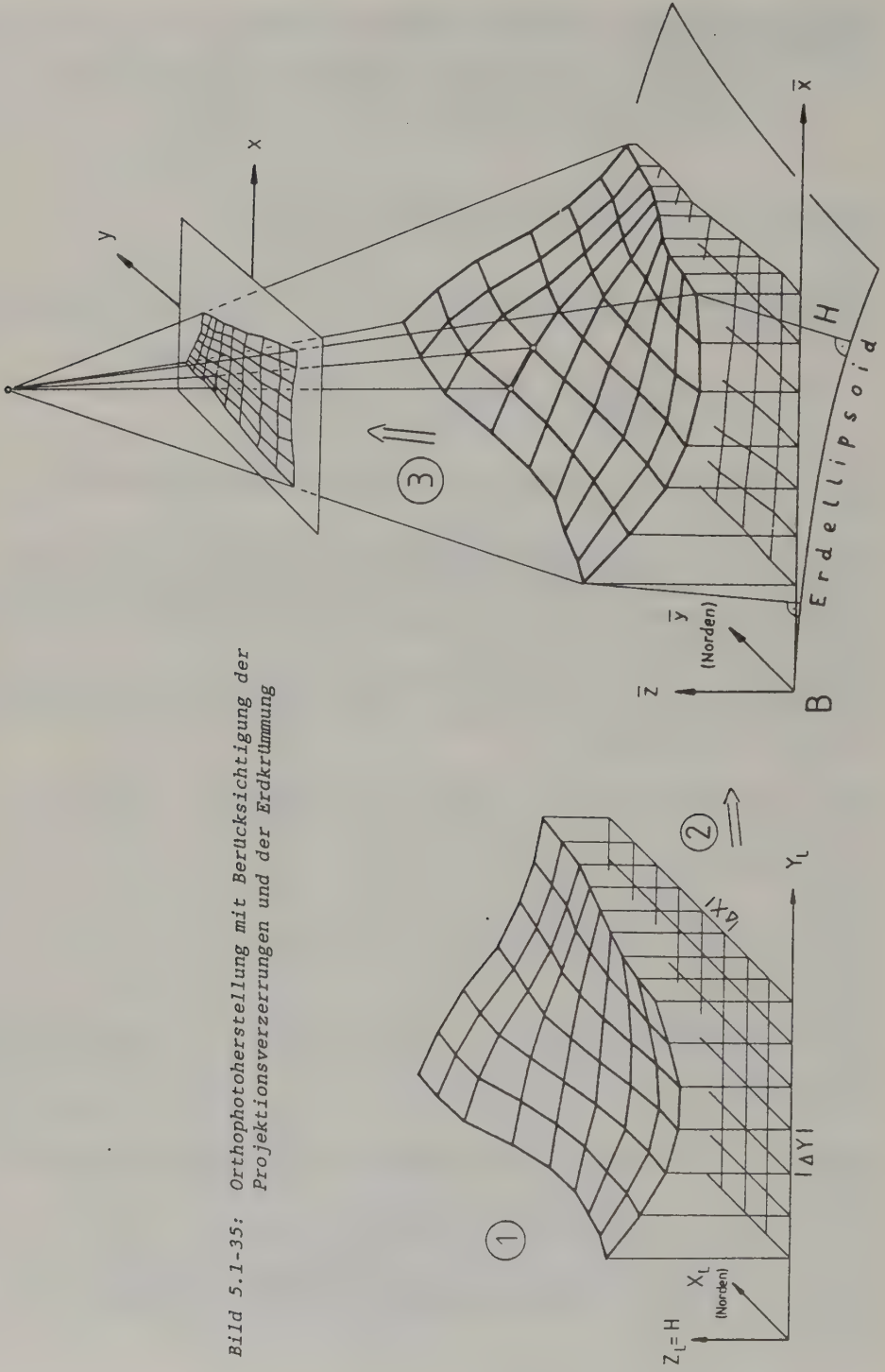


Bild 5.1-35: Orthophotoherstellung mit Berücksichtigung der Projektionsverzerrungen und der Erdkrümmung



Diese  $Y_L X_L Z_L$ -Koordinaten dürfen nicht unmittelbar mit dem Meßbild in Beziehung gebracht werden. Vorher ist die Umwandlung mit Hilfe der drei Schritte a), b) und c) in das  $xyz$ -Tangentialsystem vorzunehmen, und zwar für jeden Rasterpunkt (② im Bild 5.1-35). (Das Geländemodell im  $xyz$ -Koordinatensystem weist in der  $xy$ -Ebene natürlich keinen Quadratraster mehr auf.) Als letzter Rechenschritt kommt die Transformation der Punkte vom cartesischen  $xyz$ -System in das Meßbild (③ im Bild 5.1-35). Das Ergebnis sind die  $xy$ -Koordinaten des deformierten Rasters.

Im Umbildegerät wird das einzulegende Meßbild mittels der  $xy$ -Koordinaten photographisch so umgebildet, daß ein neues photographisches Bild entsteht, das dem Quadratraster entspricht. Infolge der Ausbreitung des Quadratrasters in der  $Y_L X_L$ -Koordinatenebene (Bild 5.1-35) bekommen wir deshalb das Orthophoto im Landeskoordinatensystem, also im Gauß-Krüger-Koordinatensystem.

Die Entstehung des Stereopartners zum Orthophoto im Landeskoordinatensystem ist im Bild 5.1-36 skizziert: Der Quadratraster wird in der  $Y_L X_L$ -Ebene des Landeskoordinatensystems, also des Gauß-Krüger-Koordinatensystems, ausbreitet. Dann werden die schräg einfallenden Projektionsstrahlen zu diesen Rasterpunkten mit dem digitalen Geländemodell geschnitten, das im Computer nach wie vor vorhanden sein muß, und zwar in der Form wie im Bild 5.1-35 in der Position ① skizziert. Von diesen Schnittpunkten ergeben sich auf diese Weise  $Y_L X_L Z_L$ -Landeskoordinaten, die in den oben erwähnten drei Schritten a), b) und c)

- in das  $xyz$ -Tangentialsystem (② im Bild 5.1-35) und dann
- in das Bild (③ im Bild 5.1-35) zu transformieren sind.

Mit den so ermittelten  $xy$ -Koordinaten erzeugt schließlich das Umbildegerät den Stereopartner.

Solche Stereopartner können vom gleichen Bild wie das Orthophoto hergestellt werden. Damit ist aber der Nachteil verbunden, daß nur die vom digitalen Geländemodell erfaßte Oberfläche stereoskopisch erscheint und die vom digitalen Geländemodell nicht erfaßten geomorphologischen Details (Erosionsrinnen, Bergspitzen etc.) sowie die Vegetationsbedeckung und die Bebauung nicht räumlich wahrgenommen werden können. Aus diesem Grund fertigt man den Stereopartner aus dem benachbarten Bild an, das mit dem Bild, aus dem das Orthophoto hergestellt wird, zu etwa 60% überlappt. Solche Stereoorthophotos haben einerseits eine Plastizität aufgrund des digitalen Geländemodelles; zusätzlich sieht man die im digitalen Geländemodell nicht erfaßten Details aufgrund der Parallaxen, die durch die Aufnahmebasis in überlappenden Photographien enthalten sind, stereoskopisch. Als Nachteil der Stereoorthophotos aus überlappenden Bildern muß erwähnt werden, daß diese entlang der Flugachse anzuordnen sind und nicht entlang der Koordinatenachsen des Landeskoordinatensystems angeordnet werden können.

Bild 5.1-37 zeigt einen kleinen Ausschnitt eines Orthophotos und eines Stereopartners aus dem Bild 4.2-24, einer Spacelab-Aufnahme mit der Zeiss RMK 30/23 (4.2.8). (Ein weitaus größeres Orthophoto aus dem gleichen Spacelab-

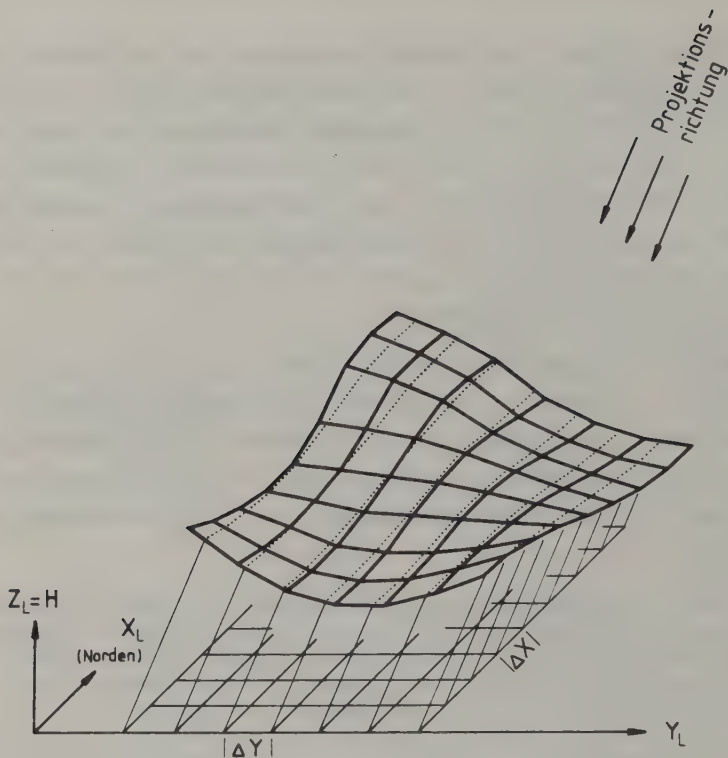
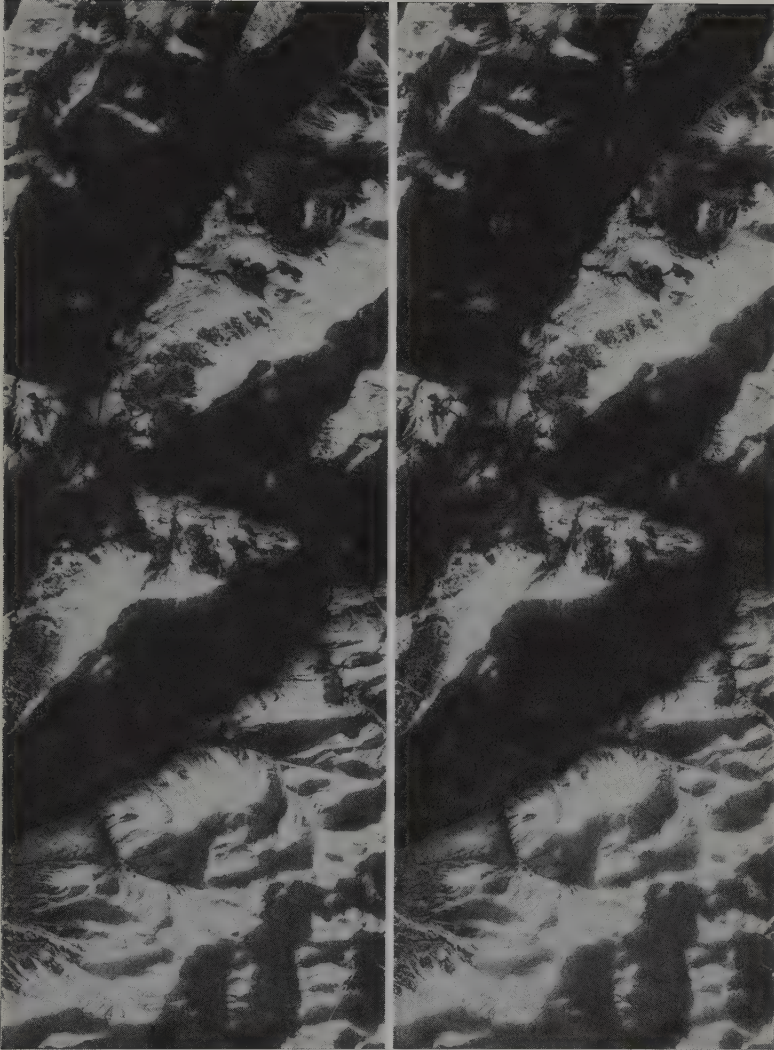


Bild 5.1-36: Stereopartner-Herstellung mit Berücksichtigung der Projektionsverzerrungen und der Erdkrümmung (die Fortsetzung ist in den Positionen ② und ③ in Bild 5.1-35 skizziert)

Bild wurde vom Institut für Kartographie und Reproduktionstechnik der TU Wien zu einer Orthophotokarte 1:200000 ausgestaltet und in Fritze et al., 1985, und Kelnhofer, 1985, publiziert. Diese Veröffentlichung enthält auch Genauigkeitsangaben.) Für den Stereopartner wurde ein künstliches Basis/Höhenverhältnis von 0.6 ( $\hat{=}$  Cotangente des Einfallswinkels der Projektionsrichtung) angenommen. Stereoorthophotos aus ein und demselben Bild bieten übrigens eine gute Plausibilitätskontrolle: Fehler im digitalen Höhenmodell bewirken ein geomorphologisch fehlerhaftes Raumbild (z.B. entlang von Flüssen gibt es abflußlose Räume).

Bild 5.1-38 zeigt etwa vom gleichen Ausschnitt das Orthophoto aus dem Bild 4.2-24 und den Stereopartner aus dem benachbarten, 60% überlappenden Space-lab-Bild. Wegen der schrägen Flugachse (Azimut etwa  $50^\circ$ ) ist das Stereoorthophoto gegenüber dem Landeskoordinatensystem verdreht. Dieses Stereoorthophoto liefert einen wesentlich detaillierteren Raumeindruck. Bei solchen Stereoorthophotos empfiehlt es sich, aus genauigkeitstheoretischen Überlegungen (D 3.) das beim Raumflug mit einer 30-cm-Meßkammer bei einer Längsüberdeckung von 60% gegebene Basis/Höhenverhältnis von 0.3 zu nehmen (Tab.5.1-10). Im Stereoorthophoto 5.1-38 sind deshalb die vom digitalen Geländemodell erfaßten Geländeformen nur halb so plastisch wie im Stereoorthophoto 5.1-37.



*Bild 5.1-37: Orthophoto und Stereopartner aus dem gleichen Spacelab-Bild*



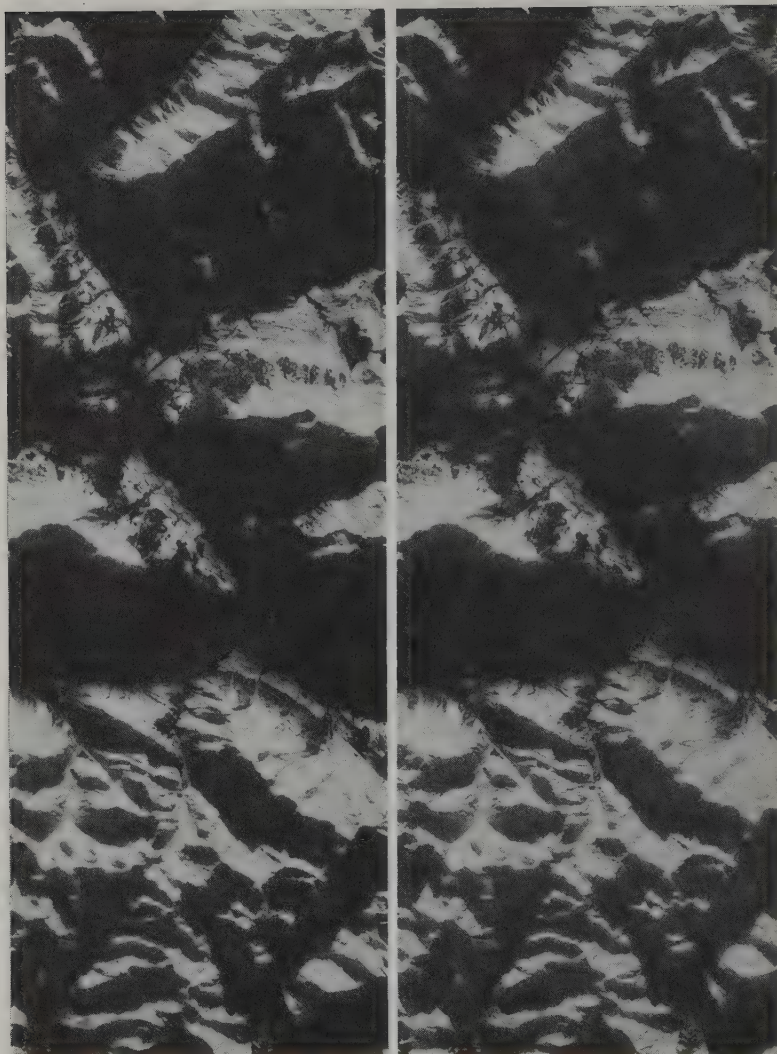


Bild 5.1-38: Orthophoto und Stereopartner aus verschiedenen Spacelab-Bildern



#### 5.1.5.3 Praxisorientierte Hinweise zur Ortho- und Stereoorthophotographie

Die Orthophotos bzw. Orthophotokarten sollte man nach Süden und nicht wie - wie bei Karten üblich - nach Norden orientieren. Der menschliche Beobachter hat sich nämlich bei der Betrachtung räumlicher Objekte daran gewöhnt, die Lichtquelle links/oben anzunehmen. Da die Satellitenbilder in der Regel vormittags aufgenommen werden, entspricht die Südorientierung der Orthophotos dem "natürlichen" Raumeindruck. Nach Norden orientierte Orthophotos ergeben im allgemeinen eine Reliefumkehr. Um den Betrachter einer Orthophotokarte, der in der Regel die Geographie nach Norden orientiert "gespeichert" hat, aber nicht zu irritieren, wird in der Praxis die Orientierung nach Norden bevorzugt (z.B. Buchroithner, 1989).

Im Rahmen der Orthophoto- und Stereopartnerherstellung entstehen photographische Folgeprodukte aus den ursprünglichen Aufnahmen. Die dadurch zwangsläufig eintretende Qualitätsminderung haben wir im Abschnitt 3.1.1.7 bereits behandelt. Das Bild 3.1-24 gilt also auch für die Kopierungen während der Orthophotoherstellung: Legt man das von der Aufnahmekamera kommende Negativ-Schwarzweißbild direkt in das Umbildegerät ein, erhält man das Orthophoto und/oder den Stereopartner als Filmpositiv (Produkt der 2. Generation). In der Praxis ist es geläufiger, daß vom Negativ-Schwarzweißfilm, wie er aus der Kamera kommt, zuerst im Kontakt Filmpositive hergestellt werden (Produkt der 2. Generation). Im Umbildegerät entsteht dann das Orthophoto und/oder der Stereopartner auf Negativ-Schwarzweißfilm (Produkt der 3. Generation), von dem im Kontakt Papierkopien (Produkt der 4. Generation) hergestellt werden. Bei der Verwendung eines Farbinfrarotfilmes in der Aufnahmekamera, der bekanntlich ein Farbpositivfilm ist (Bild 3.1-19), kommt man bereits in der 2. Generation zum Orthophoto und/oder Stereopartner, wenn man im Umbildegerät von den Originalaufnahmen auf einen Farbumkehrfilm projiziert. Der im Bild 3.1-24 ebenfalls angedeutete Weg über einen Farbnegativfilm kann ebenfalls beschritten werden.

#### 5.1.6 Phototriangulation

Für die photographische Entzerrung (5.1.2), für die Zweibildauswertung (5.1.4) und für die Orthophotoherstellung (5.1.5) benötigt man pro Bild bzw. Stereomodell etwa vier Paßpunkte. Die Ermittlung der Koordinaten dieser Paßpunkte im Gelände ist sehr kosten- und zeitaufwendig. Man hat deshalb Methoden entwickelt, die Photogrammetrie von dieser Einschränkung möglichst zu befreien. Der methodische Ansatz besteht in der simultanen Auswertung des gesamten Bildverbandes (Bild 5.1-39).

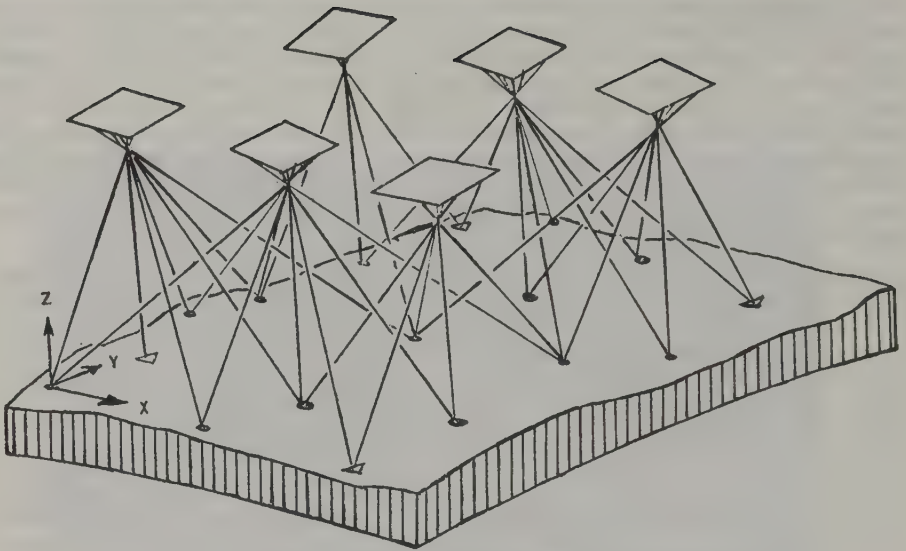


Bild 5.1-39: Grundprinzip der Phototriangulation

Eine Meßaufnahme legt ein räumliches Strahlenbündel fest. Diese Strahlenbündel sind im Rahmen einer Phototriangulation so zu verdrehen und zu verschieben, daß

- sich entsprechende Strahlen der verschiedenen Bilder in den Objektpunkten ( $\hat{=}$  Verknüpfungspunkten) schneiden und
- entsprechende Strahlen die Paßpunkte, das sind die im Landeskoordinatensystem vorgegebenen Punkte, treffen.

Ein solches Netz von Strahlenbündeln ist so stabil, daß man für den gesamten Bildverband nur einige Paßpunkte - insbesondere am Rand des Bildverbandes - benötigt. (Der Bildverband des Bildes 5.1-39 ist an den vier mit Dreiecken bezeichneten Punkten verankert.)

Die Phototriangulation ist mathematisch und EDV-technisch verhältnismäßig anspruchsvoll. Sie ist in den Abschnitten A 5.3 und B 5. ausführlich beschrieben. Sie liefert als Ergebnis die Elemente der äußeren Orientierung aller Bilder und/oder die Landeskoordinaten der Verknüpfungspunkte.

Die Phototriangulation ist gegenüber der terrestrischen Bestimmung der Paßpunkte bereits bei Bildverbänden mit mehr als ca. fünf Bildern zu empfehlen. Die Kosten der Phototriangulation sind aber noch so groß, daß

sie bei der Kalkulation großräumiger Fernerkundungsaufgaben nicht vergessen werden dürfen.

## 5.2 Geometrische Auswertung von Amateurbildern

Infolge des günstigen Preises der Amateurkameras und ihres großen Komforts beim Photographieren wird man verleitet, auch für Fernerkundungsaufgaben Amateurkameras einzusetzen. Gegen die Amateuraufnahmen sprechen:

- sehr kleines Format,
- Instabilität der Kameras,
- im allgemeinen große Objektivverzeichnung und Filmverzug,
- unbekannte innere Orientierung,
- fehlende Einrichtung für eine streifenweise Anordnung der Luft- und Weltraumbilder mit 60% Längsüberdeckung.

Trotz dieser Einschränkungen werden immer wieder Amateuraufnahmen für geometrische Aufgabenstellungen und vor allem für thematische Interpretationsaufgaben erfliegen. Eine geometrische Auswertung ist - wie in diesem Abschnitt erläutert werden soll - grundsätzlich möglich; das Verfahren ähnelt umso mehr der Auswertung mit Meßbildern, je näher die Amateurbilder den Meßbildern kommen.

Genäherte Senkrechtaufnahmen können bei kleinen Geländehöhenunterschieden - mit gewissen Einschränkungen - direkt wie Karten benutzt werden. Die Fehler dieser Photokarten infolge Bildneigungen und Geländehöhenunterschiede wurden im Abschnitt 5.1.1 formelmäßig behandelt.

Aufgabe 5.2-1: Mit einer Hasselblad, Format  $6 \times 6 \text{ cm}^2$ , Brennweite 80 mm, wurden Luftaufnahmen in einer Flughöhe von 300 m Höhe hergestellt. Die Hasselblad-Aufnahmen photographisch auf einen mittleren Maßstab 1:10000 vergrößert werden. Wie groß sind die Fehler in dieser "Karte", wenn das Gelände maximale Höhenunterschiede von 50 m aufweist und die Bildneigungen 5 gon erreichen?

Als nächste Auswertevariante sind optische und photographische Entzerrungen mittels zentralperspektivischer Umbildung (5.1.2) anzusprechen. In diesem Fall unterscheiden sich die Auswertungen mit Amateuraufnahmen wenig von Auswertungen mit Meßbildern.

Aufgabe 5.2-2: Man überlege sich, wieviele Paßpunkte für eine Entzerrung einerseits einer Meßaufnahme und andererseits einer Amateuraufnahme mindestens benötigt werden. (Lösung A 2.4)

Die vereinfachte Zweibildauswertung (5.1.3) kommt mit Amateuraufnahmen nur sehr selten in Frage. Man kann zwar auch Amateurbilder stereoskopisch be-

trachten, wenn es genäherte Senkrechtaufnahmen mit ca. 60%-iger Längsüberdeckung sind. Nachdem sie bevorzugt mit (instabilen) Hubschraubern, Sportflugzeugen und ähnlichen Plattformen aufgenommen werden, sind aber die Bedingungen für die Stereoskopie in der Regel nicht erfüllt. Noch problematischer wird eine höhenmäßige Auswertung der Amateuraufnahmen, da man die innere Orientierung, die in diesem Fall unbedingt erforderlich ist, nicht kennt.

Die strenge Zweibildauswertung (5.1.4) kommt mit Amateuraufnahmen nur bedingt in Frage. Die Elemente der äußeren und inneren Orientierung kann man nämlich mittels einer Phototriangulation (5.1.6) bestimmen. Man kalibriert, das heißt eicht, sozusagen die Amateurkameras nachträglich mit Hilfe einer Phototriangulation. Damit werden im Prinzip aus den Amateuraufnahmen Meßaufnahmen, die mit den analytischen Zweibildauswertegeräten in der bekannten Weise ausgewertet werden können.

Wenn ein digitales Geländemodell vorhanden ist, kann aus einem Amateurbild ohne weiteres ein Orthophoto hergestellt werden. Die dafür erforderliche innere und äußere Orientierung besorgt man sich zweckmäßigerweise wieder mittels einer Phototriangulation. Wenn der Zusammenhang zwischen dem digitalen Geländemodell und dem Amateurbild hergestellt ist, kann man auch auf die Herstellung eines Orthophotos verzichten und die Auswertung durch rechnerische Verschneidung des Strahlenbündels mit dem digitalen Geländemodell vornehmen (Monoplotting). Jeder im Amateurbild angemessene Punkt definiert nämlich einen Strahl zum Gelände, dessen Schnittpunkt mit dem digitalen Geländemodell sowohl die Geländehöhe als auch die beiden Lagekoordinaten liefert. (Details zu dieser Methode und umweltrelevante Anwendungsbeispiele wurden von Waldhäusl et al., 1986, veröffentlicht.)



### 5.3 Visuelle Interpretation photographischer Bilder

#### 5.3.1 Abgrenzung zu den Methoden der digitalen Bildauswertung

Obwohl die digitale Bildauswertung, die im 6. Abschnitt behandelt wird, immer mehr an Bedeutung gewinnt, wird die visuelle Interpretation, mit anderen Worten das "Lesen" im photographischen Bild, nicht so schnell verdrängt werden. Schwidefsky hat in seinem Lehrbuch (1976) die visuelle Interpretation mit folgenden Worten treffend beschrieben: "Es handelt sich dabei um das Auffinden, Erkennen und Klassifizieren abgebildeter Objekte oder Tatbestände auf der Erdoberfläche und in einer höheren Stufe um die darauf gegründete Analyse von Landschaftselementen in einer speziellen Zielrichtung. Einen hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit, aber auch seiner Kompliziertheit sehr hohen Beitrag liefert hierbei unser menschlicher Wahrnehmungsapparat, meistens ohne daß wir uns dessen bewußt sind. Ein menschlicher Bildbetrachter verfügt über die Fähigkeiten zum spontanen Erkennen sehr komplizierter Bildgestalten und zum freien Verknüpfen von Vorstellungen, er hat Phantasie und ein vielseitig organisiertes Gedächtnis. Es ist bis heute sehr schwierig und erfordert großen apparativen Aufwand, einige dieser menschlichen Fähigkeiten durch Automaten in befriedigender Weise nachzuahmen. Die Automation der Photointerpretation macht daher nur langsame Fortschritte."

Die Fortschritte der digitalen Bildauswertung für erderkundende Fragestellungen betreffen vor allem kleinmaßstäbige Bilder und jene Bilder, die bereits bei der Aufnahme in digitaler Form anfallen. Digitale Bilder werden also selten in photographische Bilder für eine anschließende visuelle Interpretation umgewandelt. Als Beispiel für die Leistungsfähigkeit einer digitalen Bildauswertung soll erwähnt werden, daß heute verhältnismäßig zuverlässig aus Satellitenbildern, die vorwiegend mit Abtastern erflogen werden, die Landnutzung automatisch ermittelt werden kann (6.8.9). Auch die Herstellung von Thermalkarten aus Scanneraufnahmen sowohl mit Satelliten als auch mit Flugzeugen wird mit der digitalen Bildauswertung erfolgreich vorgenommen.

Wenn es aber um das Erkennen einzelner räumlicher Objekte und ihrer Merkmale - vor allem in großmaßstäbigen Bildern - geht, ist die Wissensbasis der digitalen Bildauswertung (noch) zu klein. Der menschliche Erkennungsprozeß, in dem die Stereoskopie eine große Rolle spielt, beruht auf einem wesentlich umfassenderen Wissen wie zum Beispiel aus der Veröffentlichung Albertz (1970) hervorgeht.

Zum Stichwort Stereoskopie soll erwähnt werden, daß eine visuelle stereoskopische Interpretation im Vergleich zu einer visuellen Interpretation eines Einzelbildes wesentlich günstigere Voraussetzungen liefert. In einem repräsentativen praktischen Beispiel (F 2.5 und F 2.6), in dem aus Luftbildern 1:30000 die Veränderungen in der Landschaft festzustellen waren, hat man mittels Stereoskopie um etwa 50% mehr Veränderungen erkennen können als mittels eines Monobildes. Auch die Rate der Fehlinterpretationen war mit dem Stereomodell wesentlich geringer als mit dem Einzelbild. Die optische Vergrößerung war in beiden Fällen gleich.

Die Zukunft wird für viele Interpretationsaufgaben voraussichtlich eine Kombination der visuellen Betrachtung mit der EDV bringen. Zur Verbesserung der Bildqualität für die visuelle Bildinterpretation wird man z.B. die äußerst wirkungsvollen Algorithmen der digitalen Bildverarbeitung heranziehen. Den Vergleich von Farbwerten, die ein Maß für die empfangenen Strahlungswerte sind, wird der Computer zuverlässiger machen als der menschliche Beobachter. In einem solchen EDV-gestützten Interpretationssystem ist die EDV nur ein nützliches Werkzeug für den menschlichen Interpreten (Schneider, 1989).

### 5.3.2 Vorbereitungsarbeiten für eine visuelle Interpretation

Vor der eigentlichen visuellen Interpretation sollte man mit dem Bildmaterial gewisse Vorkehrungen treffen. Diese Vorbereitung des Bildmaterials ist aber heute noch nicht standardisiert. Die folgenden Ausführungen können deshalb nur als Anregungen verstanden werden.

Objektive Zuordnungen der Grau- bzw. Farbwerte der Luft- und Weltraumbilder zu den Strahlungseigenschaften der fotografierten Objekte erfordern folgende Vorkehrungen: Auf den Film bezogene Einflußfaktoren (Belichtungs- und Entwicklungsbedingungen, Empfindlichkeit der jeweiligen Filmcharge etc.) bekommt man dadurch unter Kontrolle, daß auf die Filme vor der photographischen Aufnahme Grau- bzw. Farbstufenkeile mit einem "Sensitometer" aufbelichtet werden. Von den einzelnen Stufen der Grau- bzw. Farbkeile kennt man deshalb die Bestrahlungsstärke  $E$ . Nach Abschluß des photographischen Prozesses mißt man mit einem Densitometer die Dichte  $D$  oder Transparenz  $T$  (bei Farbfilmen in den drei Grundfarben). Auf diese Weise bekommt man den funktionalen Zusammenhang zwischen den Grau- bzw. Farbwerten des Filmes mit den Bestrahlungsstärken  $E$ , die auf den Film trafen. Im Bild 5.3-1 sind auf der Ordinatenachse die Dichte  $D$  und auf der Abszissenachse der dekadische

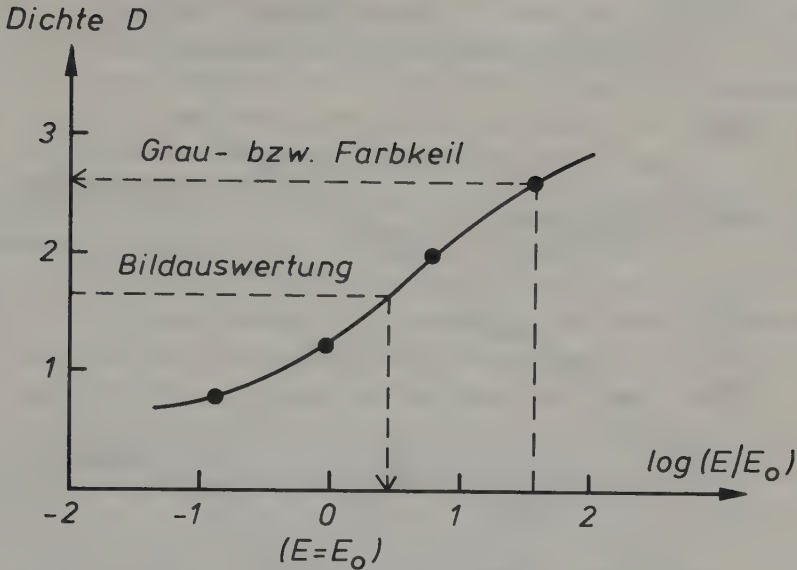


Bild 5.3-1: Grau- bzw. Farbkeil für die Bildauswertung

Logarithmus der Bestrahlungsstärke  $E$  im Verhältnis zu einem (beliebigen) Referenzwert  $E_0$  aufgetragen. Im Idealfall ist diese Kurve eine Gerade mit der Gradation  $\gamma$  als Steigung (siehe Gleichung (3.1-21)). Im allgemeinen hat man es aber mit nichtlinear reagierenden Filmen zu tun. (Siehe Abschnitt 6.5.4 und z.B. Graham, Read, 1986).

Um diese so kalibrierten Bestrahlungsstärken  $E$  der reflektierten Objektstrahlung zuordnen zu können, d.h. den Einfluß der Atmosphäre ausschalten zu können, müssen im Augenblick des Überfluges Messungen im Gelände (3.5) - z.B. des Reflexionsgrades  $\rho$  - vorgenommen werden. Im Bild 5.3-2 sind auf der Abszissenachse die im Gelände gemessenen Reflexionsgrade  $\rho$  der verschiedenen Objekte aufgetragen und auf der Ordinatenachse die kalibrierten Bestrahlungsstärken  $E$  (im Verhältnis zum Referenzwert  $E_0$ ), die an den Bildstellen der Bodenmeßstellen mit der Kennlinie des Bildes 5.3-1 gefunden wurden. Unter der Voraussetzung ebenen Geländes und unter Vernachlässigung der von der Richtung des Abbildungsstrahles abhängigen Einflußfaktoren (3.1.1.3) ist der Zusammenhang zwischen der Bestrahlungsstärke  $E$  und dem Reflexionsgrad  $\rho$  linear. Wir können demnach mit den folgenden Schritten den

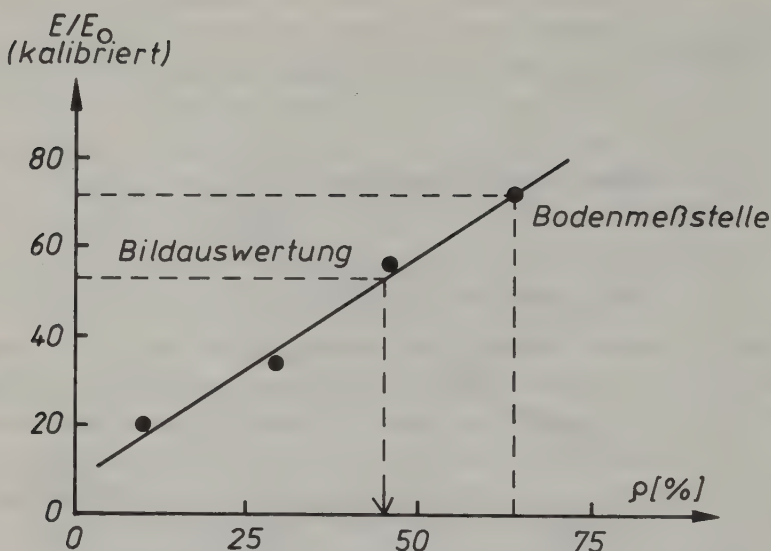


Bild 5.3-2: Zusammenhang der aus dem Bild abgeleiteten Bestrahlungsstärke  $E$  und des Reflexionsgrades  $\rho$

Reflexionsgrad aller in der Photographie abgebildeten Objekte bestimmen: Mit einem Densitometer mißt man zuerst in der Photographie an der Bildstelle, die das ausgewählte Objekt enthält, den Grau- bzw. Farbwert. Dann erhält man mit der Kennlinie des Bildes 5.3-1 eine kalibrierte Bestrahlungsstärke  $E$ , mit der aus dem Bild 5.3-2 der gesuchte Reflexionsgrad  $\rho$  des ausgewählten Objektes ersichtlich ist.

Die beschriebene Methode ist verhältnismäßig einfach; sie weist aber einige Unzulänglichkeiten auf:

- Die Grau- bzw. Farbwerte in den Filmen entstehen durch eine Integration über eine große Breite des jeweiligen Spektralbereiches, wobei auch die spektrale Empfindlichkeit  $S(\lambda)$  der Filme eine große Rolle spielt (Gleichung (3.1-23b)). Die aus den Grau- bzw. Farbwerten abgeleiteten Reflexionsgrade sind also hinsichtlich ihrer spektralen Dimension verhältnismäßig wenig aussagekräftig (weitere Details siehe 6.5.5).
- Der Einfluß der Blickrichtung - also die von  $\alpha$  in der Gleichung (3.1-15) abhängigen Größen - bleiben unberücksichtigt. Mit einer Deckfolie mit variierenden Grauwerten könnte man einige dieser Einflüsse - insbesondere den Lichtabfall zum Bildrand - teilweise berücksichtigen.
- Der Einfluß der Geländeform auf die reflektierte Sonnenstrahlung (Gleichung (3.1-14)) bleibt unberücksichtigt. Auch diesen Einfluß könnte man mit einer individuellen Deckfolie für jedes Bild berücksichtigen. Eine solche Deckfolie mit variierenden Grauwerten könnte man mit Hilfe eines digitalen Geländemodell anfertigen. Bild 5.1-24 gibt einen Eindruck über das Aussehen einer solchen Deckfolie.



Unabhängig von den Bodenbeobachtungen im Augenblick des Bildfluges kann der Interpret die (störenden) Einflußfaktoren von Film, Atmosphäre, Geländeform usw. sehr gut im Überlappungsbereich der Bilder studieren. Die Variation der Grauwerte bzw. Farbwerte ein und desselben Objektes in verschiedenen Bildern vermittelt dem Interpreten die Relativität seiner Aussagen, wenn sie nur auf die Grau- bzw. Farbwerte der Filme gestützt sind.

Bei großen Flugmissionen - z.B. über mehrere Tage - wird eine Referenzfläche mehrmals aufgenommen. Der Vergleich der entsprechenden Bilder erlaubt ebenfalls eine Beurteilung der jeweiligen Einflußfaktoren von Film, Atmosphäre usw. Treten sehr starke Farbverschiebungen z.B. infolge unterschiedlicher atmosphärischer Bedingungen auf, lohnt es sich, vor der visuellen Interpretation farbige Deckfolien auf die Bilder zu legen.

Aufgabe 5.3-1: Bei der zweimaligen Aufnahme einer Referenzfläche wurden in den beiden Farbinfrarotbildern folgende Farbdichtewerte mit einem Densitometer gemessen: Zeitpunkt  $t_1$ :  $D_{\text{rot}} = 1.2$ ,  $D_{\text{grün}} = 0.8$ ,  $D_{\text{blau}} = 0.4$ ; Zeitpunkt  $t_2$ :  $D_{\text{rot}} = 1.0$ ,  $D_{\text{grün}} = 0.8$ ,  $D_{\text{blau}} = 0.6$ . Man überlege sich die Farbdichte einer bzw. die Farbdichten zweier Korrekturfolien.

In der Vorbereitungsphase einer visuellen Interpretation tritt häufig das Problem auf, jene Stellen, in denen Bodenbeobachtungen angestellt wurden, im Luftbild zu identifizieren. Oft kommt man mit Skizzen aus, die vor Ort angefertigt werden. In manchen Fällen muß man mit Hilfe von Landeskoordinaten das Problem lösen. Zu diesem Zweck muß die Beobachtungsstelle koordinatenmäßig entweder mittels terrestrischer Messungen oder mittels Karten bzw. Orthophotos festgelegt werden. In dem zu interpretierenden Luftbild findet man die entsprechende Bildstelle mit den Formeln (5.1-5), die in computergestützten Auswertegeräten programmtechnisch verwirklicht sind.

### 5.3.3 Interpretationsschlüssel und Interpretationstraining

Die im vorhergehenden Abschnitt angedeutete physikalische Eichung der photographischen Aufnahmen, die nur im Rahmen einer digitalen Bildauswertung (6.5.4) konsequent lösbar ist, steckt noch in den Anfängen. In der Praxis geht man häufig einen anderen Weg: Die gesuchten Objektmerkmale werden direkt dem photographischen Bildinhalt zugeordnet. Die Stärke dieser visuellen Interpretation ist die gesamtheitliche Betrachtungsweise, in der man die Oberflächenstruktur, die im folgenden als Textur bezeichnet wird, gemeinsam mit der Farbe (stereoskopisch) wahrnimmt.

Der eigentlichen Interpretation geht ein intensives Interpretationstraining voraus, in dem vor Ort festgestellte Merkmale in den photographischen Bildern aufgespürt werden. Zu diesem Zweck geht man mit den Bildern ins Gelände. Dabei ist eine stereoskopische Betrachtung mit einfachen Auswertegeräten (5.1.3) sehr zu empfehlen.

Als Interpreten eignen sich in erster Linie Fachleute, in deren Wissensgebiet die zu interpretierenden Merkmale fallen. Man kann überspitzt sagen, daß der Interpret nur das im Luftbild sieht, was er erwartet. Das fachliche Hintergrundwissen schützt vor Fehlinterpretationen. Das fachliche Hintergrundwissen ist zwar für die routinemäßige Interpretation - nach entsprechendem Interpretationstraining - nicht unbedingt erforderlich, es ist aber unbedingte Voraussetzung für die Analyse der Interpretationsergebnisse (5.3.7).

Ein wesentliches Ergebnis des Interpretationstrainings ist die Festlegung eines Interpretationsschlüssels, in dem die vor Ort angetroffenen Merkmale den Merkmalen in den photographischen Bildern, im wesentlichen unterteilt in Textur und Farbe, gegenübergestellt werden. Im folgenden sollen für drei Interpretationsbeispiele die Interpretationsschlüssel in gekürzter Form angegeben werden. Dabei muß auf die normalerweise im Interpretationsschlüssel enthaltenen Bildausschnitte zur Charakterisierung der Merkmale in den Photographien verzichtet werden.

#### a) Waldschadensdokumentation

Für Farbinfrarotbilder in Maßstäben zwischen 1:5000 und 1:10000 sieht ein (vereinfachter) Interpretationsschlüssel folgendermaßen aus (Bild 5.3-3 ist eine "Definition" der Kronenzustandsstufen aus terrestrischer Sicht und Tab. 5.3-4 die Zusammenstellung der Merkmale in den Luftbildern):

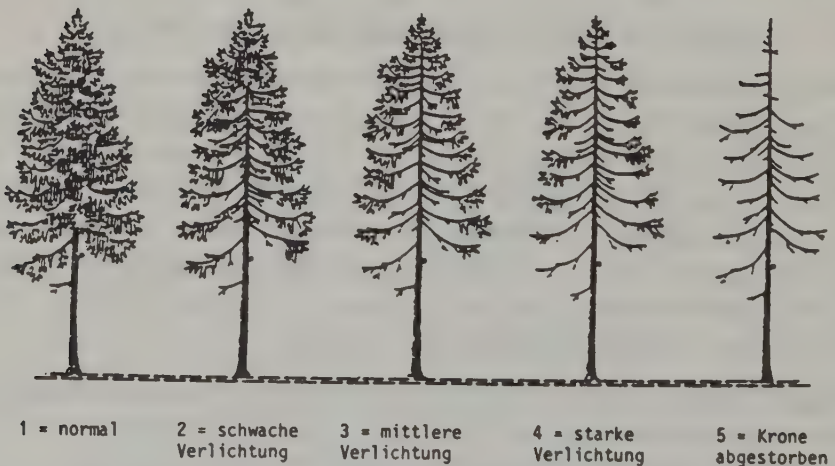


Bild 5.3-3: Vitalitätsstufen von Nadelbäumen (entnommen aus Neumann, Pollanschütz, 1988)

Vitalitätsstufe	Textur	Farbe
1	Spitze mit sternförmigen Strahlen, aber nicht skelettartig; dicht.	rotbraun; verhältnismäßig dunkel.
2	teilweise skelettartig ausgeprägte Aststrahlen.	rotbraun bis hellrot; ungleichmäßig gefärbt.
3	scharfe Konturen der Astpartien.	"marmoriertes" Rot bis Blaugrün.
4	sehr schütterere Krone.	Blaugrün bis Grün.

Tab. 5.3-4: Interpretationsschlüssel für Fichte  
(entnommen aus Zirm et al., 1985)

Weiterführende Literatur für Waldzustandserhebungen aus Farbinfrarotbildern: Tzschupke, 1984, Seger, 1986, Schneider, 1989.

#### b) Almkartierung

Für eine Belebung der Almwirtschaft war der Vegetationszustand der Arlingalm (Oberösterreich) zu erfassen. Zu diesem Zweck wurden Farbinfrarotbilder im Maßstab 1:6500 erflogen. Der Interpretationsschlüssel soll anhand eines kleinen Ausschnittes im Bereich einer Schlepplifttrasse erläutert werden (Bild 5.3-5 und Tab. 5.3-6):



Bild 5.3-5: Testkartierung für den Interpretationsschlüssel "Arlingalm"  
(entnommen aus Wernecke, 1986, Fi = Fichte)

Code	Vor Ort	Textur	Farbe
1	Weide mit guten Gräsern und Kräutern	geschlossene Oberfläche	hellrot mit kleinen roten Flecken
2	Weide mit Rodungsvegetation (überwucherte Baumstümpfe etc.)	"fleckige" Oberfläche; teilweise kugelige Erhebungen	hellrot, dazwischen grössere blaugrüne Flecken
3	Weide mit Bäumen durchsetzt	Baumkronen, dazwischen glatte Flächen	Weide rot
U1	Ampfer	knollig wie Styroporkugeln	rotlila
U2	Brennnessel	kleinkugelig (kleiner als U1)	kirschrot (dunkler als U1)
U3	Wurmfarn	sehr feinkörnig	blaßrosa
U4	Weißer Germer	Punkte mit Schatten	hellrosa (mit U3 verwechselbar)

Tab. 5.3-6: Auszug aus dem Interpretationsschlüssel "Arlingalm"  
(entnommen aus Wernecke, 1986)

### c) Schilfkartierung

Beim dritten Beispiel sollen nicht die Merkmale in der Natur den Merkmalen im Bild gegenübergestellt werden, sondern es soll der Interpretationsschlüssel im Hinblick auf die computergestützte Auswertung erläutert werden. Es wurde ein 3-ziffriger Interpretationsschlüssel gewählt (Bild 5.3-7):





Bild 5.3-7: Schilfkartierung Neusiedler See (Csaplovics, 1982)

1. Ziffer: (Dichte)	1 ^ Seewasser
	2 ^ Braunwasser
	3 ^ Schilf < Wasser
	4 ^ Schilf = Wasser
	5 ^ Schilf > Wasser
	6 ^ dichtes Schilf
2. Ziffer: (Höhe)	1 ^ abgestorben, geknickt
	2 ^ mittlere Höhe
	3 ^ normale Höhe
3. Ziffer: (Vitalität)	1 ^ Jungschilf
	2 ^ mittleres Alter
	3 ^ Altschilf

Tab. 5.3-8: Interpretationsschlüssel zu Bild 5.3-7

Ein Interpretationsschlüssel, wie er bei der Schilfkartierung gewählt wurde, bietet die Möglichkeit, nach Digitalisierung der einzelnen Flächen mit Hilfe eines Informationssystems (5.1.4.4 ) z.B. folgende Fragen zu beantworten:

- Wie groß ist der Altschilfbestand, der bereits geknickt ist und eine hohe Dichte aufweist ?
- Wie groß ist der Jungschilfbestand mittlerer Höhe in Bereichen, in denen die Wasserfläche gegenüber der Schilffläche überwiegt ?

Die EDV-technische Seite eines Interpretationsschlüssels spielt in der Praxis eine immer größere Rolle. Nur jene Merkmale, die in den Code aufgenommen werden, stehen anschließend für Abfragen - im allgemeinen in mehreren Kombinationen - zur Verfügung.

Sind in einem Projekt mehrere Interpreten beteiligt, sollten sie gemeinsam den Interpretationsschlüssel erarbeiten. Dazu benötigt man Zweibildauswertegeräte mit einem Einblick für einen zweiten Beobachter (5.1.3). Bei umfangreichen Interpretationsprojekten ist in gewissen Zeitabständen ein Testgebiet zu interpretieren und mit den früher erhaltenen Ergebnissen zu vergleichen. Nur auf diese Weise lassen sich homogene Ergebnisse über lange Zeiträume erzielen.

#### 5.3.4 Flächenkartierung

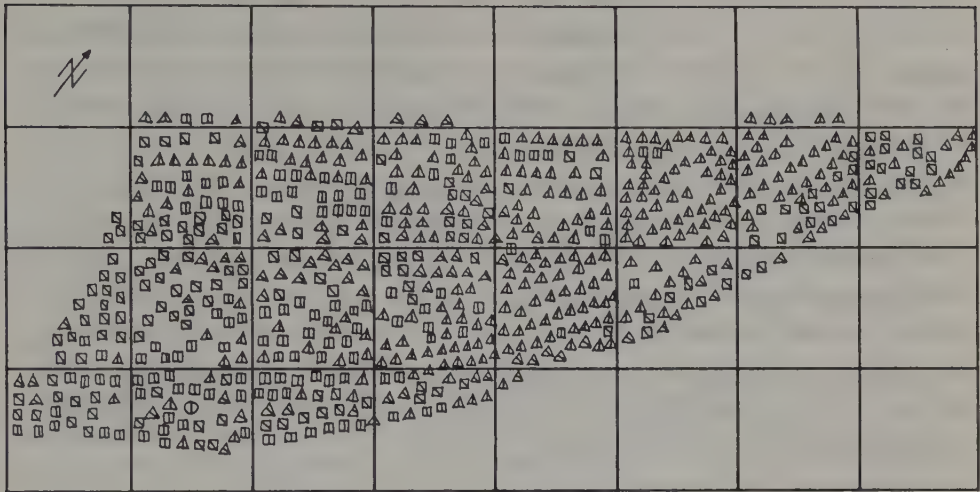
Für viele Interpretationsaufgaben läuft die thematische Interpretation darauf hinaus, Flächen mit gleichen Merkmalen gegeneinander abzugrenzen. Die Bilder 5.3-5 und 5.3-7 sind diesbezügliche Beispiele.

Eine solche Flächenkartierung eignet sich auch für die Interpretation der Landnutzung, aber auch für die Interpretation der Bodenarten und ihrer Bonitäten (Quendler, Stechauner, 1984). Auch bei der Interpretation der Vegetationsschäden kann man Flächen gleicher Vitalitätsstufen bilden, wobei allerdings noch zusätzlich die jeweilige Vegetationsart als flächenbegrenzendes Merkmal anzugeben ist.

Das zuletzt erwähnte Beispiel führt uns methodisch in eine andere Richtung: Gerade bei der Interpretation der Vegetationsschäden braucht man verhältnismäßig große Bildmaßstäbe, in denen man die einzelnen Objekte (Bäume der jeweiligen Art) erkennt. Für den jeweiligen Baum wird dann der Zustand festgestellt und auch entsprechend festgehalten. In diesem Fall sprechen wir von einer Einzelobjektinterpretation:

#### 5.3.5 Einzelobjektinterpretation

Die Einzelobjektinterpretation ist die detaillierteste Interpretationsmethode. Sie hält für jedes Individuum seine Merkmale fest. Bild 5.3-9 zeigt das Interpretationsergebnis für einen geschädigten Pappel-/Erlenwald aus Farbinfrarotbildern im Maßstab 1:6600.



- |   |              |   |          |   |        |
|---|--------------|---|----------|---|--------|
| ○ | Schadstufe 1 | ○ | } Pappel | ○ | } Erle |
| ◻ | Schadstufe 2 | ◻ |          | ◻ |        |
| △ | Schadstufe 3 | △ |          | △ |        |
| ▲ | Schadstufe 4 |   |          |   |        |

Bild 5.3-9: Interpretationsergebnis eines geschädigten Pappel-/Erlenwaldes  
(entnommen aus Csaplovics, 1982)

Den Aufwand für die Einzelbauminterpretation kann man sich nur für kleine Areale leisten. Im folgenden Abschnitt lernen wir Methoden kennen, mit denen die Einzelobjektinterpretation auf landesweite Erhebungen ausgedehnt werden kann.

#### 5.3.6 Stichprobenverfahren und Rastermethode

Die erste Variante für eine Reduzierung des mit der Einzelobjektinterpretation verbundenen hohen Aufwandes besteht darin, sogenannte Leitobjekte herauszugreifen und nur sie genau zu untersuchen. Bei der Waldschadenskartierung wählt man als Leitbaum gerne die Fichte. Sie ist besonders immissionsempfindlich, und ihr Zustand ist deshalb ein guter Indikator für die jeweilige Umweltbelastung. In diesem Fall beschränkt sich der Interpret auf die Feststellung der Schadstufen für alle Bäume, die zu der Baumart zählen, die als Leitbaum ausgewählt wurde.

Ein zweiter methodischer Ansatz zur Reduzierung des Interpretationsaufwandes besteht darin, in einem geometrisch vorgegebenen Raster Stichproben zu ziehen. Streng genommen kann man einen regelmäßigen Raster nur über ein Orthophoto legen. Falls für die Interpretation die Originalbilder verwendet werden, mußte man den regelmäßigen Raster im Landeskoordinatensystem definieren und ins jeweilige photographische Bild transformieren (Bild 5.1-33 auf der linken Hälfte). Dieser so entstandene deformierte Raster wäre auf eine Deckfolie zu zeichnen und für die Bildinterpretation auf das jeweilige photographische Bild zu legen (Kölbl, 1978). Da die Herstellung dieser Deckfolien sehr aufwendig ist - man erhält für jedes photographische Bild eine eigene Deckfolie und außerdem ist ein digitales Geländemodell erforderlich - begnügt man sich in der Praxis oft mit einem einzigen regelmäßigen Raster für alle Bilder (Zirm et al., 1985).

In den Eckpunkten eines solchen Rasters, das einen Abstand von einigen Zentimetern hat, werden - bei der Waldschadensdokumentation - einige Bäume sowohl hinsichtlich ihrer Art als auch ihres Vitalitätszustandes klassifiziert. Aus den Ergebnissen der Stichprobe, die z.B. 1% aller Bäume erfaßt, kann auf den Zustand des gesamten Areals geschlossen werden. Mit welchen Unsicherheiten dabei zu rechnen ist, wurde im Abschnitt E 4. angegeben.

In Baden-Württemberg (Hildebrandt, Kadro, 1984) hat man bei der Waldschadenserhebung den Aufwand noch weiter reduziert, indem man auf lückenlos nebeneinander gereichte Flugstreifen verzichtet hat und nur Flugstreifen 1:5000 im Abstand von 8 km geflogen ist. Innerhalb eines Flugstreifens hat man jedes dritte Bild interpretiert, wobei ein regelmäßiger Raster mit einem Abstand von 5 cm im Bild benutzt wurde. Die Stichprobe in jedem Rasterpunkt umfaßte ca. 20 Bäume.

In der Praxis werden auch kombinierte Methoden von Flächenkartierung und rasterförmigen Stichproben eingesetzt (Otepka, 1987). Man muß die zu wählende Methode an den finanziellen Möglichkeiten ausrichten. Dabei lautet die Devise weniger "Verkleinerung des Bildmaßstabes", sondern "Beibehaltung eines großen Bildmaßstabes und Verringerung des Stichprobenumfanges".

### 5.3.7 Analyse der Interpretationsergebnisse

Die Analyse der Interpretationsergebnisse setzt sehr viel Hintergrundwissen voraus, das weit über das Beherrschen der Interpretationstechnik hinausreicht. Die Interpretationsergebnisse sollten daher nur von jenen Fach-



leuten analysiert werden, die sich schwerpunktmäßig mit dem jeweiligen Thema beschäftigen.

In eine solche Analyse der Interpretationsergebnisse gehen in der Regel nicht nur die aus Luftbildern ermittelten Interpretationsergebnisse ein, sondern man besorgt sich noch zusätzliche Informationen. Zu den Begleitmaßnahmen einer Waldschadensdokumentation z.B. gehören die sogenannten Nadelanalysen. Man "erntet" von einigen Testbäumen die Nadeln, unterteilt sie nach Nadeljahrgängen und ermittelt ihren Gehalt an Schwefel, Stickstoff, Phosphor, Kalium usw. Weiters entnimmt man Bodenproben und analysiert die Luft.

In einschlägigen Publikationen (z.B. Katzmann, 1984) findet man in diesem Zusammenhang folgende, hier geringfügig abgewandelte Sätze: "Da die Vegetation standortgebunden ist und zusätzlich einen - im vitalen Zustand - fünfzig- bis hundertmal intensiveren Gasaustausch hat als tierische Organismen, ist sie bevorzugt von Immissionen betroffen. Pflanzen können somit - bei Beachtung ihrer physiologischen Ansprüche - gleichsam als Meßinstrumente lokaler Umweltbelastung gelten. Der Gesundheitszustand der Waldvegetation wird so gewissermaßen zum Gradmesser der Reinheit der Luft. ... Zur Verifizierung der Interpretationsergebnisse sind Vergleiche im Gelände anzustellen, um gegebenenfalls durch bestimmte Standortbedingungen hervorgerufene Vitalitätsunterschiede von solchen trennen zu können, die schädigungsbedingt sind. Die Kenntnis der örtlichen, ökologischen und forstlichen Gegebenheiten ist somit eine sehr wesentliche Voraussetzung für das Analysieren der Interpretationsergebnisse."

Aufgabe 5.3-2: TM-Aufnahmen von LANDSAT 4 und 5 (Abschnitt 4.2.3) haben bisher wenig zur Dokumentation von Waldschäden beitragen können. Es trat sogar das Phänomen auf, daß der Kanal 4 (nahes Infrarot) in stark geschädigten Zonen höhere Strahlungswerte aufwies als in gesünderen Zonen. Man überlege sich an Hand der Bildelementgröße von  $30 \times 30 \text{ m}^2$  und des Bildes 3.1-22 dieses Phänomen. (Hinweis: In die Überlegungen ist auch die Kraut- und Strauchschicht auf dem Waldboden einzubeziehen.)

## 6. DIGITALE BILDVERARBEITUNG

Die digitale Bildverarbeitung (digital image processing) ist heute bereits ein selbständiges Wissensgebiet, das von Elektronikern, Informatikern, Mathematikern sowie Physikern getragen und in der Medizin, Robotertechnik etc. angewandt wird. Wir beschränken uns auf die digitale Bildverarbeitung im Bereich der Erdbeobachtung. Zuerst sind Ausführungen zur Farbtheorie und einige Definitionen angebracht.

### 6.1 Farbtheorie und Definitionen

#### 6.1.1 Bemerkungen zur Farbtheorie

Im alltäglichen Sprachgebrauch wird das Wort "Farbe" für verschiedene Begriffe verwendet, so z.B. als Synonym für "Färbemittel" oder für "Bunttheit". Im folgenden wird der Begriff "Farbe" für einen Buntzustand verwendet, wobei auch die gesamte Grauskala von Schwarz bis Weiß einbezogen wird. Es ist wichtig, sich bewußt zu sein, daß es sich um Wahrnehmungen des menschlichen Sehorganes handelt, also nicht um eindeutige physikalische Größen, sondern um Empfindungen, die von Mensch zu Mensch unterschiedlich sein können.

Um für den praktischen Gebrauch die Vielfalt der Farben einordnen zu können, hat man Farbsysteme entwickelt, die auf physiologischen und psychologischen Grundlagen aufbauen. Im physiologischen Bereich werden die physikalischen Gegebenheiten mit dem menschlichen Sehsinn verknüpft, im psychologischen Bereich geht es um Empfindungen.

##### 6.1.1.1 Der Farbwürfel

Die Sehnerven enden in der menschlichen Netzhaut in Form der sogenannten Zäpfchen und Stäbchen. Die Zäpfchen sind für die Farbwahrnehmung verantwortlich. Im wesentlichen gibt es Empfindungen in drei Farbbereichen: im Blau, im Grün und im Rot. Alle anderen Farben entstehen durch Mischung dieser drei Empfindungen.

Es ist daher naheliegend, diese drei Farben als Koordinatenachsen in einem dreidimensionalen kartesischen System anzunehmen.<sup>1</sup> Als Koordinatenwerte

---

<sup>1</sup> Es ist daher auch naheliegend, die Farbfilme mit diesen drei Grundfarben aufzubauen (3.1.1.4).

werden die Intensitäten aufgetragen (von 0%  $\hat{=}$  schwarz bis 100%  $\hat{=}$  Vollfarbe), die für eine Farbmischung notwendig sind. Man erhält dann einen sogenannten Farbkörper in Form eines Würfels (Bild 6.1-1), an dessen Ecken die Farben Rot, Grün, Blau ( $\hat{=}$  Grundfarben oder Primärfarben der additiven Farbmischung), Cyan ( $\hat{=}$  Blaugrün), Magenta ( $\hat{=}$  Purpur), Yellow ( $\hat{=}$  Gelb)<sup>1</sup> ( $\hat{=}$  Grundfarben oder Primärfarben der subtraktiven Farbmischung), Schwarz und Weiß angeordnet sind. (Die additiven und subtraktiven Grundfarben wurden im Abschnitt 3.1.1.4.1 erklärt.) Komplementäre Farben liegen symmetrisch zum Würfelmittelpunkt. Die Diagonale Schwarz-Weiß enthält den gesamten Graukeil. Die Farbkoordinaten R,G,B werden auch als Farbwerte bezeichnet.

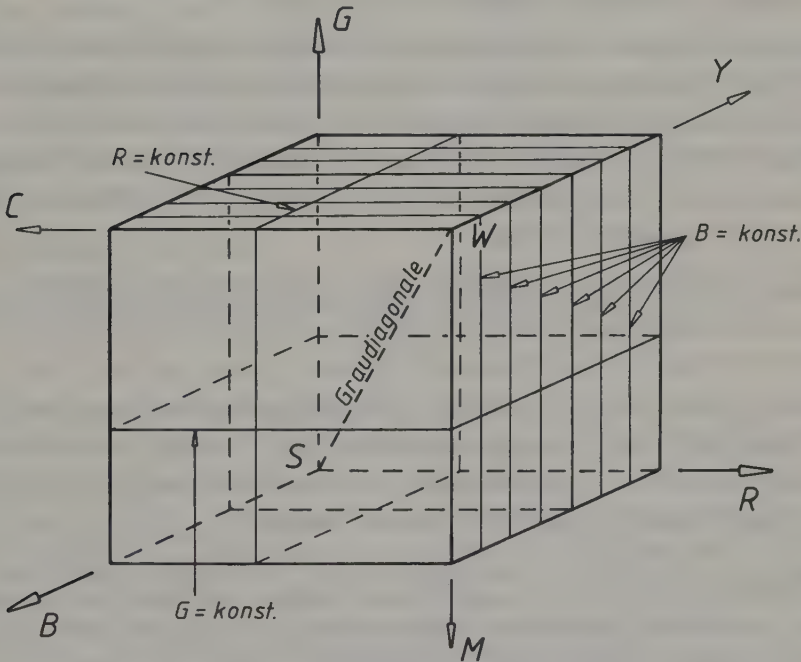


Bild 6.1-1: Der Farbwürfel

<sup>1</sup> Manchmal werden in der Literatur die Farben Cyan und Magenta auch als Blau und Rot bezeichnet und die additiven Grundfarben Rot und Blau auch als Orange und Violett. Diese unterschiedlichen Bezeichnungen führen sehr leicht zu Mißverständnissen. Die Farbe Gelb wurde hier mit dem englischen Wort Yellow angegeben, um in der Folge die eindeutigen Abkürzungen R,G,B, C,M,Y und S,W (schwarz, weiß) verwenden zu können.

net. Die Einheitsvektoren, die den Farbraum aufspannen, werden als Primärvalenzen R,G,B bezeichnet<sup>1</sup>.

Es ist leicht zu erkennen, daß der Würfel als Grundlage sowohl für additive als auch für subtraktive Farbmischung verwendet werden kann. Im ersten Fall liegt der Nullpunkt bei "Schwarz", im zweiten Fall bei "Weiß". Sind die Farbwerte einer Farbe für die additive Mischung gegeben, so braucht man für die subtraktive Mischung nur das Komplement der Farbwerte nehmen und der Farbe der diagonal gegenüberliegenden Würfelseite zuordnen.

Zahlenbeispiel: Für die Farbe "Braun" seien folgende additive Koordinaten gegeben. (Für die Vollfarbe gelte  $1.0 \hat{=} 100\%$ ): Rot = 0.4, Grün = 0.3, Blau = 0.1. Die subtraktiven Koordinaten ergeben sich mit: Cyan =  $1 - 0.4 = 0.6$ , Magenta =  $1 - 0.3 = 0.7$ , Yellow =  $1 - 0.1 = 0.9$ .

Der Farbwürfel eignet sich sehr gut als Grundlage für Farbtafeln, die als Schnitte durch den Würfel parallel zu einer Würfelfläche zu denken sind. In den so entstehenden Quadraten kann in einer Richtung der Anteil der ersten Grundfarbe und in der anderen Richtung der Anteil der zweiten Grundfarbe abgelesen werden. Jedes Quadrat ist dann noch mit einem konstanten Anteil der dritten Grundfarbe unterlegt.

Beispiel: Tafel 0 enthält Mischungen von Rot und Grün ohne Blauanteil.  
Tafel 1 enthält Mischungen von Rot und Grün mit Blauanteil 0.1 ( $\hat{=} 10\%$ ).  
usw.

Farbtafeln müssen auf ein gegebenes Bildwiedergabesystem abgestimmt sein, da es keine allgemein gültigen Grundfarben gibt, sondern diese sich von System zu System leicht unterscheiden. Außerdem ist nicht garantiert, daß alle Intensitätstufen linear wiedergegeben werden.<sup>2</sup>

Aufgabe 6.1-1: Für eine Druckausgabe sollen Farbtafeln erzeugt werden, wobei Gelb als konstanter Anteil jedem Quadrat unterlegt werden soll. Parallel zu welchen Würfelflächen muß der Würfel geschnitten werden (Angabe der Farben der Eckpunkte)? Welche Würfelfläche entspricht der ersten Farbtafel, wenn in dieser kein Gelbanteil vorhanden sein soll?  
(Lösung: Parallel zu Blau, Cyan, Weiß, Magenta bzw. Yellow, Rot, Schwarz, Grün; 1.Tafel = Blau, Cyan, Weiß, Magenta)

Aufgabe 6.1-2: Aus einer für die Druckausgabe hergestellten Farbtafel wurden für eine Farbe folgende Werte entnommen: M = 100%, C = 45% und Y = 25%. Auf einem RGB-Monitor soll eine diesen Angaben entsprechende Farbe darge-

<sup>1</sup> Der Begriff "Valenzen" wird laut deutschsprachiger Farbnorm DIN 5033 immer für die Einheitsvektoren in Farbräumen verwendet.

<sup>2</sup> Bei der Bildwiedergabe ist außerdem zu beachten, daß die Abstufung der Farbwerte nach einer logarithmischen Funktion erfolgen muß, um dem Auge eine Linearität vorzutäuschen (3.1.1.4.2).



stellt werden, wobei die Intensitätsangabe für R,G,B durch ganzzahlige Werte von 0 ( $\hat{=}$  keine Intensität) bis 255 ( $\hat{=}$  volle Intensität) erfolgt. Welche Intensitätswerte für R,G,B entsprechen der gewünschten Farbe?

(Lösung:  $R = 255 \cdot (100 - 45) / 100 = 140$

$G = 255 \cdot (100 - 100) / 100 = 0$

$B = 255 \cdot (100 - 25) / 100 = 191$ )

#### 6.1.1.2 Das Farbdreieck

Der Farbwürfel erlaubt eine räumliche Anordnung aller Farben und entspricht somit den durch das Wahrnehmungsvermögen gegebenen drei Farbdimensionen. Für jede Farbe existiert ein eindeutiger Punkt im Farbraum. In diesem Abschnitt wird ein System, das sogenannte Farbdreieck, vorgestellt, welches die Mischungsverhältnisse, also nur relative Größen, veranschaulicht. Die dritte Dimension geht dabei verloren. Es gibt unendlich viele Farben, denen die gleichen Mischungsverhältnisse zugrunde liegen. Obwohl die Darstellung im Farbdreieck nicht eindeutig ist, sind manche Probleme sehr anschaulich zu zeigen (wie etwa die Einbeziehung der physiologischen und physikalischen Gegebenheiten der Farbwahrnehmung). Das Farbdreieck hat deshalb besondere Bedeutung erlangt.

#### Das Maxwell'sche Dreieck:

Das Farbdreieck läßt sich auf einfache Weise aus dem Farbwürfel ableiten. Verbindet man die Würfecken auf den R,G,B-Koordinatenachsen miteinander, so erhält man ein schräg im Würfel liegendes gleichseitiges Dreieck (Bild 6.1-2). Auf die Fläche dieses Dreieckes bildet man durch eine Zentralprojektion, mit dem Schwarzpunkt als Projektionszentrum, den gesamten Farbraum ab. Auf einem Projektionsstrahl liegen alle Farben mit gleichem Verhältnis R:G:B. Die Lage des Durchstoßpunktes durch das Dreieck ist dann charakteristisch für ein bestimmtes Mischungsverhältnis. Nicht die Länge des Farbvektors, sondern dessen Richtung ist entscheidend. In färbigen Darstellungen des Dreieckes werden der Dreiecksfläche die Farben der vom Projektionsstrahl durchstoßenen Würfel Flächen zugeordnet. Somit liegen in den Dreiecksseiten die Farben jener Würfelkanten, die nicht den Schwarz- bzw. Weißpunkt enthalten, also der gesamte Farbkreis Blau-Cyan-Grün-Yellow-Rot-Magenta-Blau; im Schwerpunkt SP liegt Weiß.

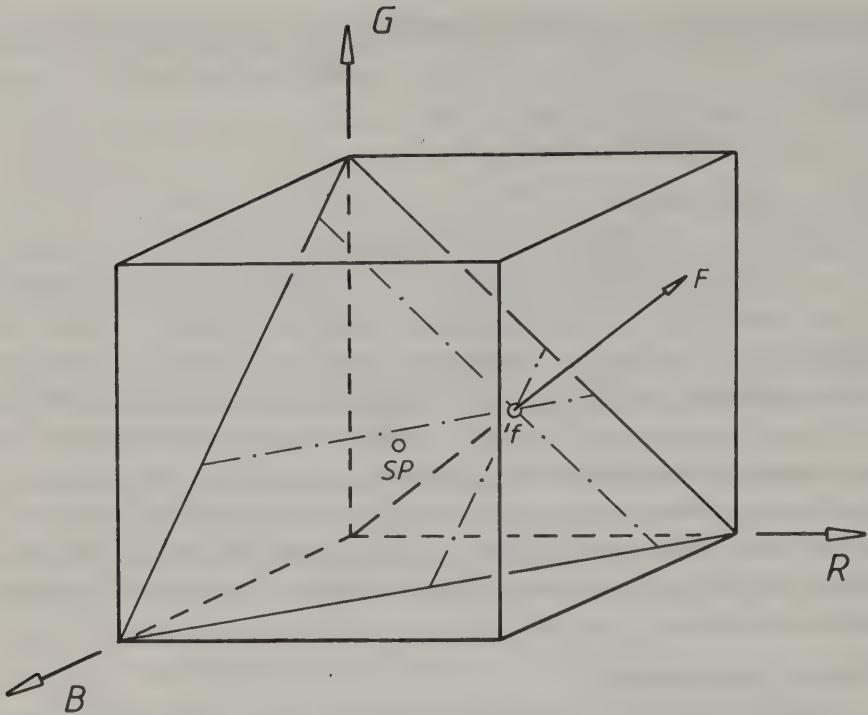


Bild 6.1-2: Farbwürfel und Farbdreieck

Die analytische Gleichung der räumlichen Dreiecksebene lautet:

$$R + G + B = m ,$$

wobei  $m$  die Würfelseite ist. Für einen Würfel mit der Seitenlänge 1 lauten die auf dieser Dreiecksfläche liegenden, mit  $r, g, b$  bezeichneten Farbwerte:

$$r = \frac{R}{R + G + B} \quad g = \frac{G}{R + G + B} \quad b = \frac{B}{R + G + B} \quad (6.1-1)$$

Diese normierten Werte  $r, g, b$  sind nicht voneinander unabhängig, da  $r+g+b=1$  gilt. Für eine Farbcharakterisierung sind daher nur zwei Werte notwendig. Man verwendet i.a.  $r$  und  $g$ . Der dritte Wert  $b$  errechnet sich mit  $b=1-r-g$ .

Die Verhältnisse zwischen  $r, g$  und  $b$  lassen sich in einem gleichseitigen Farbdreieck mit der Seitenlänge 1, das auch als Maxwell'sches Dreieck bezeichnet wird, darstellen. Die  $r$ - und  $g$ -Werte werden darin als schiefwinkelige Koordinaten aufgetragen (Bild 6.1-3).  $r$  wird als Abszisse und  $g$  als Ordinate betrachtet. Auch der  $b$ -Wert kann direkt aufgetragen oder abgegriffen werden. Die Lage eines Punktes innerhalb des Dreieckes wird als Farbort bezeichnet.

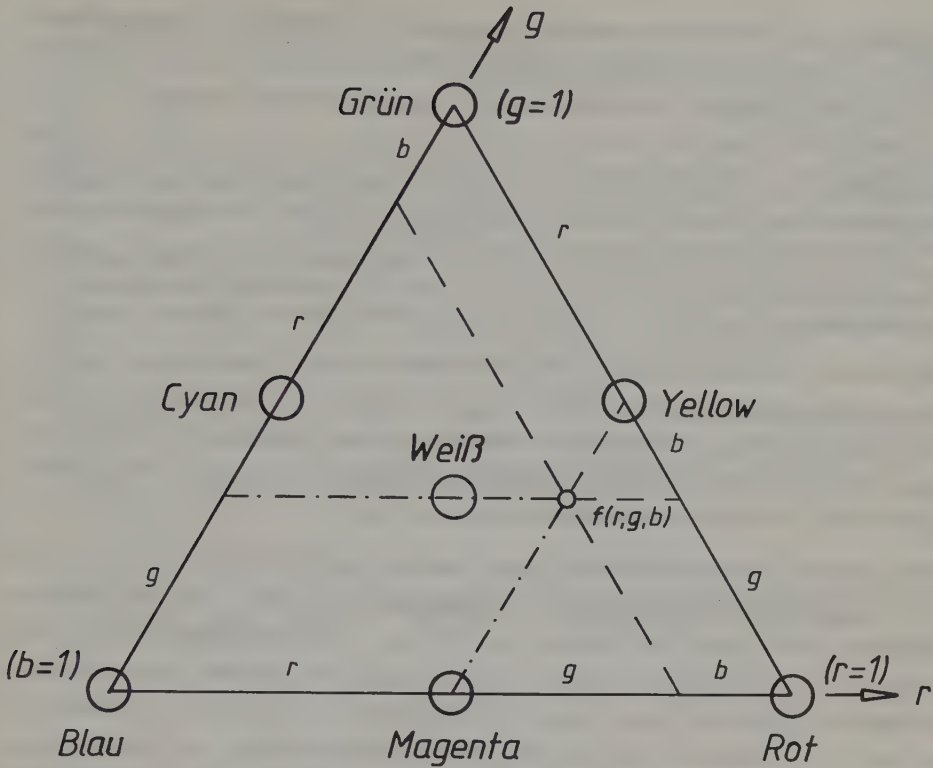


Bild 6.1-3: Das Farbdreieck

Zahlenbeispiel: Die aus einer Farbtafel entnommenen RGB-Werte (mit  $R, G, B \in [0, 255]$ ) für eine braune Farbe seien:  $R=127$ ,  $G=85$ ,  $B=42$ . Dann gilt:  
 $\Sigma = R+G+B = 254$ .  $r = R/\Sigma = 127/254 = 0.5$ ,  $g = G/\Sigma = 85/254 = 0.334$  und  
 $b = B/\Sigma = 42/254 = 0.166$  oder  $b = 1-r-g = 0.166$ . Dieser Farbtort ist im Bild 6.1-3 eingetragen.

Die Rückrechnung bekannter  $r, g, b$ -Koordinaten in Würfelkoordinaten ist nicht mehr eindeutig. Alle  $R, G, B$ -Werte, die das Verhältnis  $r:g:b$  erfüllen, stellen mögliche Lösungen dar. Es sind dies alle Farben, die auf ein und demselben Projektionsstrahl liegen.

Zahlenbeispiel: Gegeben seien  $r = 0.5$  und  $g = 0.334$ . Daraus errechnet sich  $b$  mit  $1-r-g = 0.166$ .

Es sollen RGB-Werte in einem Farbwürfel ( $R, G, B \in [0, 255]$ ) berechnet werden.

Annahme:  $R = 255 \Rightarrow G = g \cdot R / r = 171$ ,  $B = b \cdot R / r = 84$

oder:  $R = 127 \Rightarrow G = 85$ ,  $B = 42$

oder:  $R = 20 \Rightarrow G = 13$ ,  $B = 7$

usw.

Aufgabe 6.1-3: Die Farbe Cyan sei durch die subtraktiven Farbkoordinaten  $C=100$ ,  $M=0$ ,  $Y=0$  (mit  $C,M,Y \in [0,100]$ ) gegeben. Welche  $r,g,b$ -Werte entsprechen dieser Farbe im Farbdreieck?

(Lösung: CMY (100,0,0)  $\rightarrow$  RGB (0,100,100),  $\Sigma=200$ ,  $r=R/\Sigma=0$ ,  $g=G/\Sigma=0.5$ ,  $b=1-r-g=0.5$ )

Aufgabe 6.1-4: Die Koordinaten  $r,g$  im Farbdreieck für eine bestimmte Farbmischung seien (0.249,0.123). Auf einem RGB-Monitor eines Bildverarbeitungssystems soll diese Farbe mit maximaler Helligkeit dargestellt werden. Man berechne die Werte  $R,G,B$ , wobei gelte  $R,G,B \in [0,255]$ .

(Lösung:  $b=1-r-g=1-0.249-0.123=0.628$ ; max. Helligkeit heißt, daß mindestens einer der Werte  $R,G,B$  die höchste Intensität ( $\hat{=}$  Wert 255) haben muß. Da  $b$  das Maximum von  $r,g,b$  ist, wird  $B=255$  angenommen.  $R=r \cdot B/b=101$ ,  $G=g \cdot B/b=50$ )

Die Form des gleichseitigen Dreieckes symbolisiert, daß die drei Farbkomponenten gleichberechtigt sind. In der Praxis ist jedoch das Arbeiten mit schiefwinkligen Koordinaten unbequem. Das Farbdreieck wird daher meistens als rechtwinkeliges, gleichschenkeliges Dreieck dargestellt, wobei die Schenkel die Koordinatenachsen bilden.

Anstelle der Festlegung einer Farbe durch  $r,g$ -Koordinaten ist es auch üblich, Farbton und Sättigung im Farbdreieck anzugeben. Für den Farbton charakteristisch ist die Richtung des Vektors "Weißpunkt-Farbpunkt". Alle Farbpunkte, die auf diesem Vektor liegen, haben den gleichen Farbton. Komplementäre Farbpunkte liegen diametral zum Weißpunkt. Als Sättigung bezeichnet man das Verhältnis der Strecke "Weißpunkt-Farbpunkt" zur Strecke vom Weißpunkt bis zum Schnittpunkt mit der Dreiecksseite. Damit sind die Farben der Dreiecksseiten als voll gesättigt, der Weißpunkt als ungesättigt definiert. Farben gleicher Sättigung liegen auf konzentrischen Dreiecken. Farbton und Sättigung könnte man auch als polare Farbkoordinaten bezeichnen. Farbsysteme, die auf diesen beiden Angaben basieren, werden etwas später behandelt. (Kapitel 6.1.1.3)

#### Das CIE-Normfarbdiagramm:

Bisher wurde immer von drei Grundfarben für die Farbmischung gesprochen, ohne daß diese Farben etwa durch Angabe physikalischer Größen näher festgelegt worden wären. Im folgenden werden daher die physikalischen Grundlagen mit einbezogen und gleichzeitig die Farbempfindlichkeit des Auges mit berücksichtigt.

Die CIE (Commission Internationale de l'Eclairage = Internationale Beleuchtungskommission) hat umfangreiche Untersuchungen durchgeführt und bereits im Jahre 1931 ein Farbsystem, basierend auf dem Farbdreieck, festgelegt, das international als Norm anerkannt wird. Die drei Wellenlängen



$B_C = 435.8 \text{ nm}$ ,  $G_C = 546.1 \text{ nm}$  und  $R_C = 700.0 \text{ nm}$  wurden als monochromatische Grundfarben (sog. spektrale Primärfarben) angenommen. Die Einheitsvektoren  $\underline{R_C}, \underline{G_C}, \underline{B_C}$  heißen in der deutschsprachigen Norm "spektrale Primärvalenzen". Beim CIE-Farbsystem wird festgestellt, mit welchen Intensitäten diese drei spektralen Primärfarben gemischt werden müssen, um eine Abstimmung mit einer vorgegebenen Farbe zu erreichen. Bild 6.1-4 zeigt das Prinzip eines Farbvergleiches, bei welchem folgende Voraussetzungen einzuhalten sind:

- Die Beleuchtungsstärke ist ausreichend hoch zu wählen, sodaß das Farbunterscheidungsvermögen gut entwickelt ist. Sie darf nicht zu hoch sein, um nicht grell zu wirken und um keine Blendung zu erzeugen.
- Das beobachtete Farbfeld ist frei von umgebenden Dingen zu halten, sodaß die Farbe frei im Raum zu schweben scheint.
- Die Größe des Feldes wird so gewählt, daß ein Gesichtsfeldöffnungswinkel von etwa  $2^\circ$  gegeben ist. Die Mitte des Feldes ist vom Beobachter anzuvisieren, sodaß der Farbeindruck in der Netzhautfovea entsteht. (In der Netzhaut konzentrieren sich die farbeempfindlichen Zäpfchen in der Fovea (= Netzhautgrube) in einem Bereich, der einem Öffnungswinkel von etwa  $2^\circ$  entspricht.)
- Das beobachtete Feld ist in zwei gleich große Teile geteilt, die gegeneinander farblich abgestimmt werden müssen. Die Erfassung der Meßdaten erfolgt in dem Augenblick, in dem der Beobachter beide Feldteile als gleich empfindet.

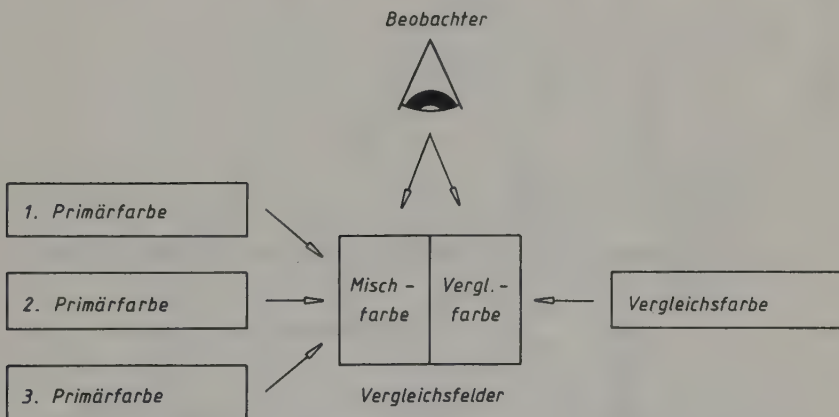


Bild 6.1-4: Anordnung für experimentellen Farbvergleich

Mit Hilfe einer großen Anzahl von Beobachtern wurde versucht, alle sichtbaren Spektralfarben, die alle mit gleicher Strahlungsenergie vorgegeben wurden, auf oben erwähnte Weise nachzumischen. Als Ergebnis dieser Untersuchung erhielt man die Anteile  $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$  der Primärfarben, die für die Mischung erforderlich waren. Es ist jedoch nicht möglich, alle Spektral-

farben mit den gegebenen spektralen Primärfarben zu erzeugen. In einem solchen Fall wird eine näherungsweise Abstimmung mit zwei spektralen Primärfarben erzeugt, von der dritten wird soviel der vorgegebenen Spektralfarbe beigemischt, bis Farbgleichheit erreicht ist. Der Anteil dieser dritten spektralen Primärfarbe wird als negativer Wert festgehalten. Bild 6.1-5 zeigt die wellenlängenabhängigen Anteile, die man Farbreizfaktoren des sogenannten "2°-Normalbeobachters" benennen könnte. In der deutschsprachigen Norm werden sie als "Spektralwerte" bezeichnet. (Eine Tabelle mit Zahlenwerten für die Spektralwerte  $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$  befindet sich z.B. bei Wyszecki und Stiles, 1976.)

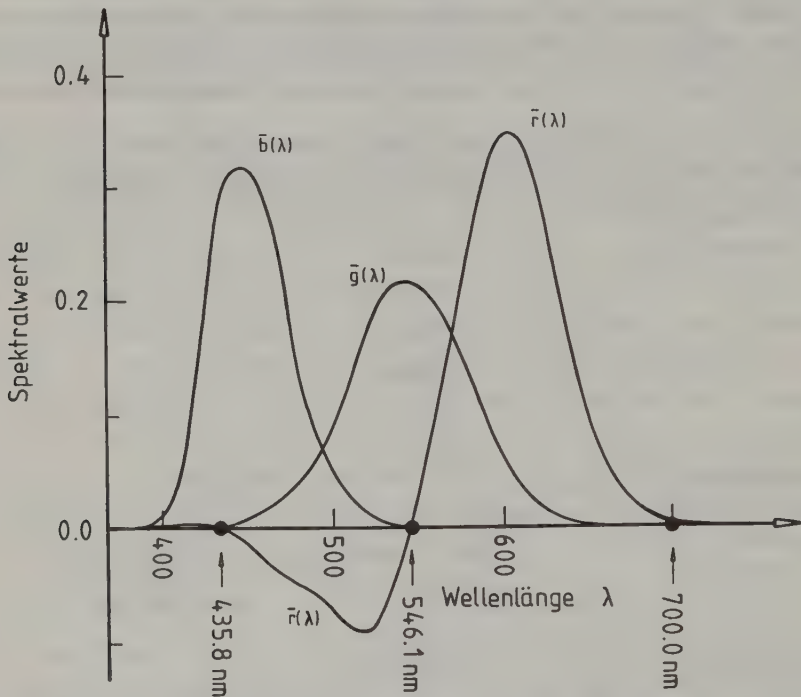


Bild 6.1-5: Spektralwertkurven  $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$  basierend auf den spektralen Primärvalenzen 435.8, 546.1 und 700.0 nm (Wyszecki und Stiles, 1967)

Beispiel: Die Spektralfarbe der Wellenlänge 500 nm kann mit den drei spektralen Primärfarben nicht nachgemischt werden. 0.072 Anteile der spektralen Primärfarbe 700.0 nm mußten der Spektralfarbe 500 nm beigemischt werden, um eine Übereinstimmung mit einer Mischung aus 0.048 Anteilen der spektralen Primärfarbe 435.8 nm und 0.085 Anteile der spektralen Primärfarbe 546.1 nm zu erhalten (siehe Bild 6.1-5).

Für jede Spektralfarbe ist damit das Verhältnis der Primärvalenzanteile  $\bar{r}:\bar{g}:\bar{b}$  bekannt. Diese Verhältnisse lassen sich durch Normierung auf 1 in  $r,g,b$ -Farbdreieckskoordinaten umrechnen und im Farbdreieck auftragen. Man erhält dann den gesamten Spektralfarbenzug in der Farbdreiecksdarstellung (Bild 6.1-6), dessen Endpunkte die Farbbörter der Grenzwellenlängen des menschlichen Sehsinns, 380 nm und 780 nm, repräsentieren.

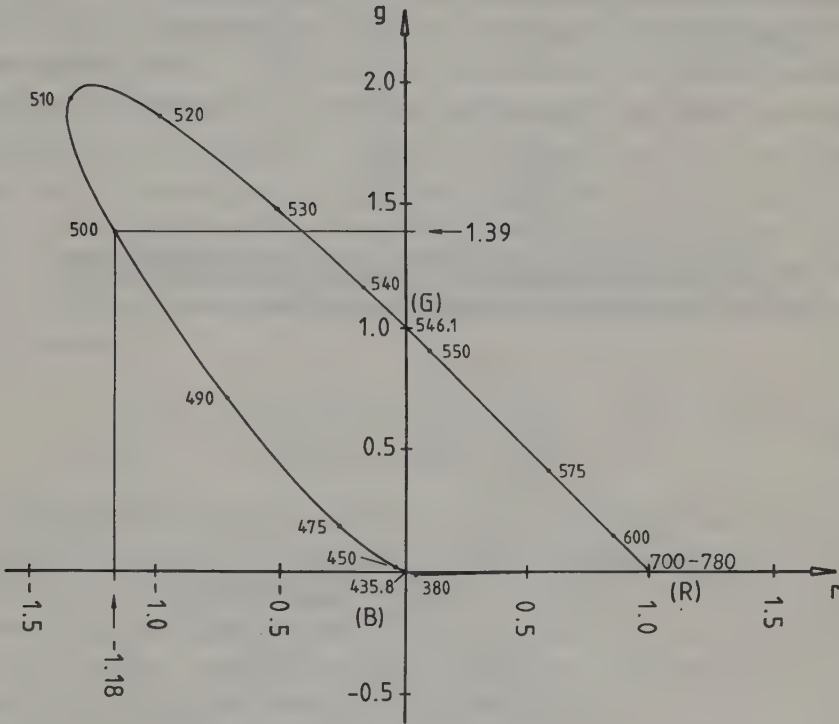


Bild 6.1-6: Spektralfarbenzug im Farbdreieck, abgeleitet aus den experimentell gewonnenen Spektralwertkurven

Zahlenbeispiel: Die Spektralfarbe 500 nm hat folgende Spektralwerte:  $r=-0.072$ ,  $g=0.085$ ,  $b=0.048$ . Für die Eintragung in das Farbdreieck müssen die  $r,g,b$ -Werte durch Normierung berechnet werden.  $\Sigma=r+g+b=-0.072+0.085+0.048=0.061$ .  $r=\bar{r}/\Sigma=-1.18$ ,  $g=\bar{g}/\Sigma=1.39$ ,  $b=1-r-g=0.79$ . Im Bild 6.1-6 ist der Farbbort für die Spektralfarbe 500 nm gekennzeichnet.

Aus den Primärvalenzen mischbar sind nur jene Farben, welche innerhalb der Dreiecksfläche (435.8-564.1-700.0) liegen. Bei dem großen Teil der Kurve,

der im negativen Bereich liegt, handelt es sich um jene Farben, die nicht nachgemischt werden können (vergleiche negative Kurventeile im Bild 6.1-5).

Das Arbeiten mit negativen Werten ist unpraktisch. Durch eine "Farbtransformation" kann man diesen Nachteil auf einfache Weise beseitigen. Wie im dreidimensionalen geometrischen Raum, dürfen analog dazu auch im Farbraum Koordinatentransformationen durchgeführt werden. Eine Veranschaulichung dieses Vorgehens soll mit Hilfe des Farbwürfels geschehen. Wählt man im Farbwürfel drei beliebige Farben, so stellen diese drei Farbvektoren die Einheitsvektoren ( $\hat{=}$  Primärvalenzen) eines neuen Koordinatensystems mit den gewählten Farben als Primärfarben dar (Bild 6.1-7). Diese Vorgangsweise entspricht einer räumlichen Affintransformation im Farbraum, für die gilt:

$$\begin{pmatrix} R_T \\ G_T \\ B_T \end{pmatrix} = \underline{A} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

$R, G, B$  sind die Farbwerte einer Farbe im ursprünglichen Farbraum  
 $\underline{A}$  ist die Transformationsmatrix für die Farbtransformation  
 $R_T, G_T, B_T$  sind die Farbwerte der Farbe in neuen Farbraum.

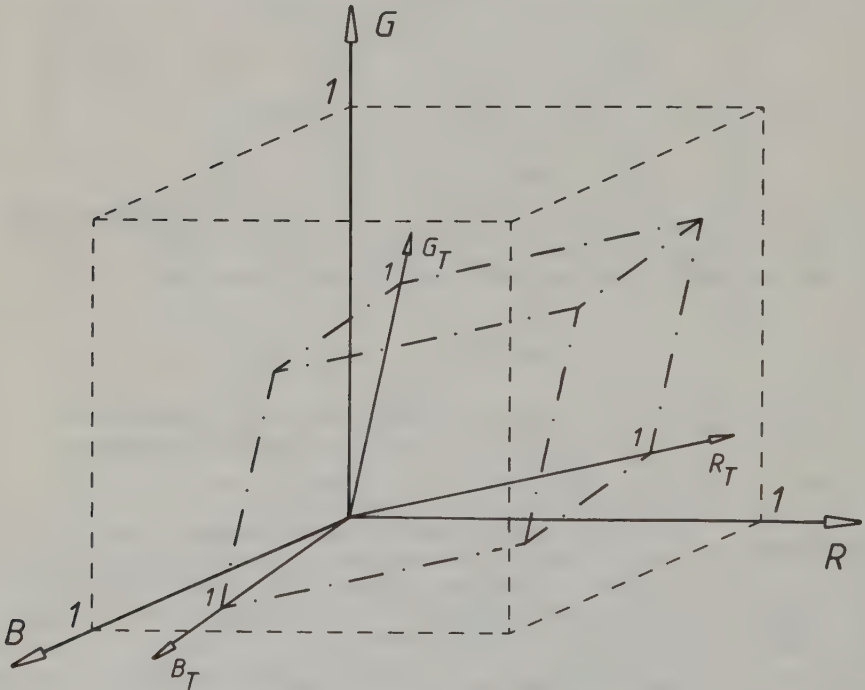


Bild 6.1-7: Transformation im Farbraum



Das Bild 6.1-7 zeigt den Farbwürfel und drei frei gewählte Farben  $R_T, G_T, B_T$ , welche die Primärfarben eines neuen Farbkoordinatensystems sein sollen und dessen Einheitsvektoren festlegen. Es entsteht ein Farbkörper, ein Rhomboeder, das von den Einheitsvektoren des neuen Systems aufgespannt wird. Für die Darstellbarkeit von Farben in einem neuen System gibt es im wesentlichen zwei Einschränkungen:

- Negative Anteile können - in einem rein additiv arbeitenden Visualisierungssystem - nicht dargestellt werden.
- Die maximal mögliche Leuchtdichte des im Visualisierungssystem verwendeten Lichtes ist aus physikalischen Gründen beschränkt, sodaß auch für die positiven Anteile Grenzen gegeben sind.

Allerdings werden Farbtransformationen nicht nur dazu verwendet, Farbanteile verschiedener Visualisierungssysteme zueinander in Beziehung zu setzen, auch für theoretische Überlegungen ist es oft vorteilhaft ein neues Farbsystem einzuführen.

Die CIE verwendet eine solche Farbtransformation, um einerseits den Spektralfarbenzug zur Gänze im positiven Bereich des Farbdreieckes abbilden zu können und um andererseits die grüne Spektralwertkurve dem Helligkeitsempfinden  $V(\lambda)$  (siehe Band 1, Anhang 2.3-1) des menschlichen Auges anzupassen. Die transformierten Farbwerte heißen Normfarbwerte und werden mit  $X, Y, Z$  (anstelle von  $R, G, B$ ) bezeichnet. Die Transformation wurde folgendermaßen festgelegt:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.7689 & 1.7518 & 1.1302 \\ 1.0000 & 4.5907 & 0.0601 \\ 0.0000 & 0.0565 & 5.5943 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (6.1-2)$$

Die neuen Primärvalenzen  $\underline{X}, \underline{Y}, \underline{Z}$  werden in der deutschsprachigen Norm als "Normvalenzen" bezeichnet. Rechnet man die Spektralwertkurven  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$  mit dieser Transformationsgleichung um, so ergeben sich daraus die sogenannten "Normspektralwert"-Kurven  $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ , die keine negativen Werte mehr enthalten (Bild 6.1-8). (Eine Tabelle mit Zahlenwerten für die Normspektralwerte  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  befindet sich im Anhang 6.1-1.)

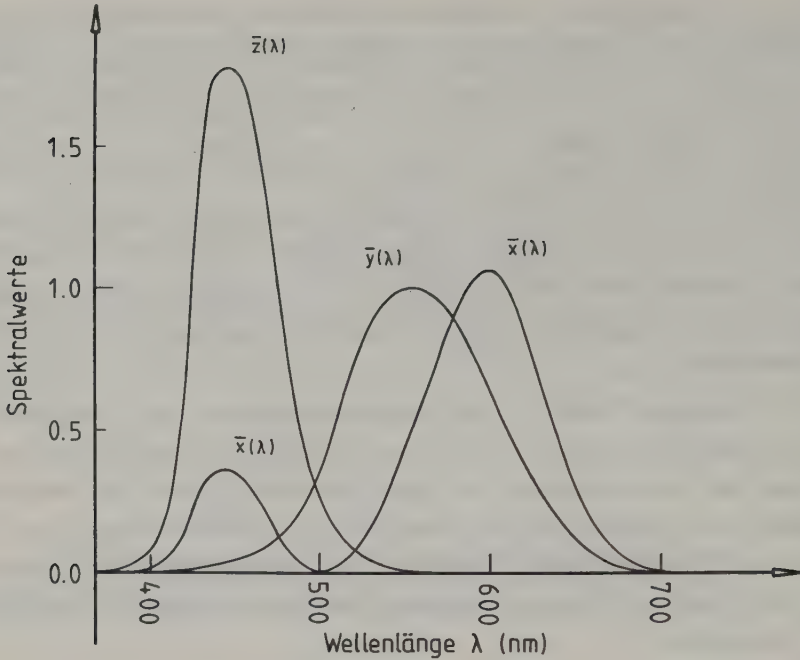


Bild 6.1-8: Normspektralwertkurven  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$   
(Wyszecki und Stiles, 1967)

Trägt man den anhand dieser Kurven berechneten Spektralwertezug im Farbdreieck ein (die Berechnung erfolgt auf dieselbe Weise wie für die Spektralwerte  $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$ ), so erhält man das bekannte CIE-Normfarbdiagramm (Bild 6.1-9).

Die Dreieckspunkte  $(x, y) = (1, 0), (0, 1), (0, 0)$  liegen jetzt nicht mehr auf dem Spektralfarbenzug, sondern teilweise weit außerhalb. Das bedeutet, daß es sich bei den Normvalenzen nicht mehr um reelle, d.h. darstellbare Farben handelt. Die Normvalenzen sind reine Rechengrößen und werden deshalb mit den abstrakten Buchstaben  $X, Y$  und  $Z$  bezeichnet. Sie können als "übersättigte" Farben angesehen werden, deren Sättigung wesentlich größer ist als die größtmögliche Sättigung der entsprechenden reellen Spektralfarben.

Aufgabe 6.1-5: Gegeben sind die Farbkoordinaten  $R, G, B$  von drei Punkten  $(0.5, 0.2, 0.6)$ ,  $(0.4, 0.3, 0.5)$  und  $(0.3, 0.4, 0.4)$ . Man berechne die Normfarbwerte  $X, Y, Z$ .

Aufgabe 6.1-6: Man weise nach, daß die drei in der Aufgabe 6.1-5 transformierten Punkte auch nach der Affintransformation (6.1-2) auf einer Geraden liegen.

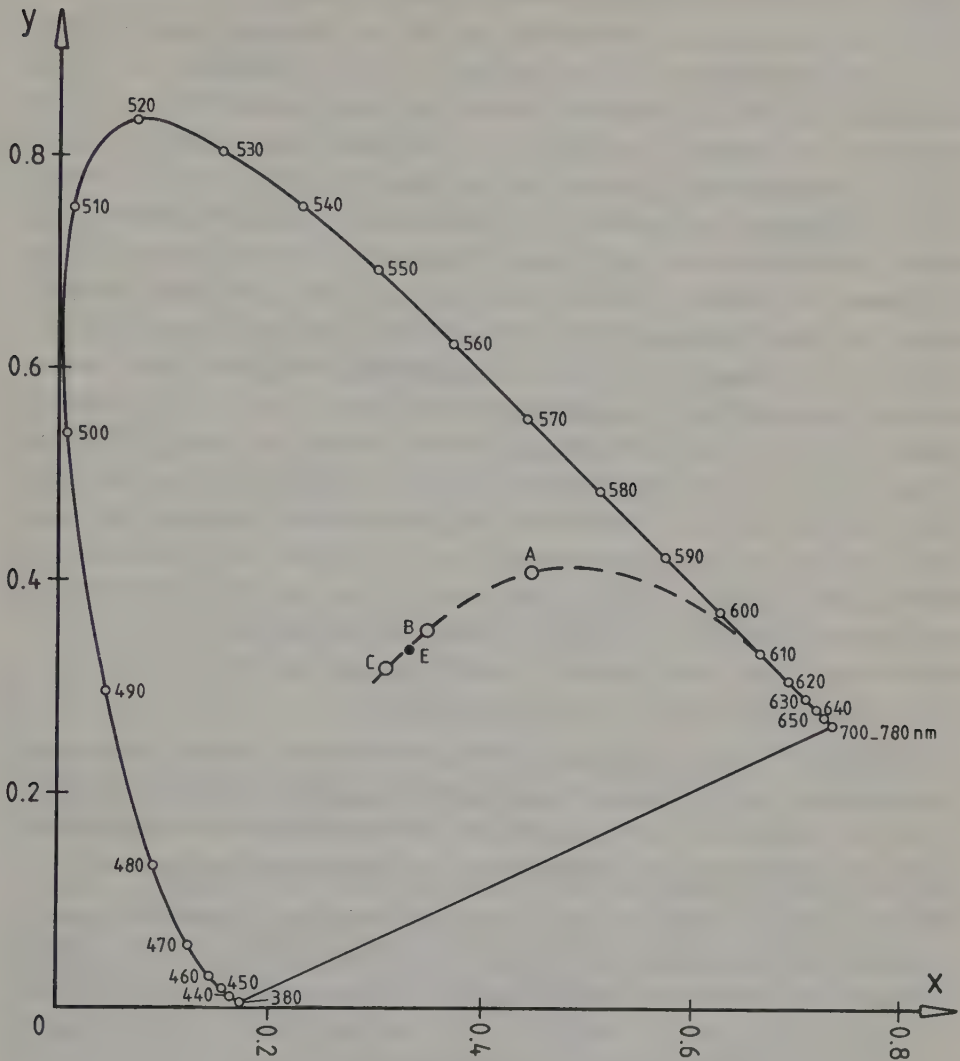


Bild 6.1-9: CIE-Normfarbdiagramm für die Normvalenzen  $\underline{X}, \underline{Y}, \underline{Z}$  (weiter: Farbwörter der Normlichtarten A, B, C und der energiegleichen Lichtquelle E, worauf später eingegangen wird)

Aufgabe 6.1-7: Man invertiere die Gleichung (6.1-2) und berechne aus den  $\underline{X}, \underline{Y}, \underline{Z}$ -Koordinaten (= Ergebnis der Aufgabe 6.1-5) wieder die R, G, B-Koordinaten.

### Regeln für die additive Farbmischung mit Hilfe des Normfarbdiagrammes

Bevor eine allgemeine Definition für den Begriff Lichtquelle gegeben wird, soll, ohne Beschränkung der Allgemeinheit, eine Lichtquelle als monochromatischer Strahler betrachtet werden, der Strahlungsenergie  $Q$  in einer bestimmten Wellenlänge  $\lambda_1$  aussendet. Die Bestimmung des Farbortes  $(x, y, z)$  einer solchen Lichtquelle erfolgt nach den gleichen Regeln, wie sie bereits bei der Berechnung des gesamten Spektralfarbenzuges angewandt wurden. Will man die Normfarbwerte  $X_1, Y_1, Z_1$  wissen, benötigt man die für die menschliche Wahrnehmung maßgebende Strahlungsenergie. Diese erhält man durch Multiplikation der Strahlungsenergie  $Q(\lambda_1)$  der Lichtquelle mit den Normspektralwerten  $\bar{x}(\lambda_1), \bar{y}(\lambda_1), \bar{z}(\lambda_1)$ , die also als Farbreizfaktoren bezeichnet werden könnten. Soll eine zweite monochromatische Lichtquelle mit der Strahlungsenergie  $Q(\lambda_2)$  mit der ersten additiv gemischt werden, so sind deren Normfarbwerte  $X_2, Y_2, Z_2$  zu den Normfarbwerten  $X_1, Y_1, Z_1$  vektoriell zu addieren (Bild 6.1-10). Die zwei Farbvektoren der Normfarbwerte spannen eine Ebene auf, in welcher auch der Summenvektor liegt. Der Schnitt mit der Ebene des Maxwell'schen Dreieckes ergibt eine Gerade, wobei der Durchstoßpunkt  $M_{12}$  des Summenvektors immer zwischen den beiden Durchstoßpunkten  $F_1$  und  $F_2$  der Farbvektoren liegt. Diese Tatsache ist allgemein gültig und nicht auf die Mischung monochromatischer Lichter beschränkt.<sup>1</sup>

Es gilt daher im Normfarbdiagramm: Die Farbörter aller mit zwei Lichtquellen mischbaren Farben liegen auf der Verbindungsgeraden zwischen den Farbörtern der Lichtquellen. Die Lage auf der Geraden hängt von der Länge der Farbvektoren, also von den Normfarbwerten der beiden Lichtquellen ab.

Fügt man noch eine dritte Lichtquelle hinzu, so bilden die Durchstoßpunkte  $F_1, F_2$  und  $F_3$  der Vektoren ein Dreieck (siehe Bild 6.1-10), innerhalb dessen Fläche die Örter aller Farben liegen, die durch additive Mischung der drei Lichtquellen gebildet werden können. Diese Regel ist in analoger Weise für die Mischung beliebig vieler Lichtquellen fortsetzbar.

<sup>1</sup> Die Bestimmung der Farbörter, die sich durch subtraktive Mischung ergeben, kann nicht auf diese einfache Weise erfolgen. Die spektralen Energieverteilungen der zu mischenden Farben ergeben miteinander multipliziert die Energieverteilung der Mischfarbe, anhand der der Farbort bestimmt werden kann. (Schultze, 1975).



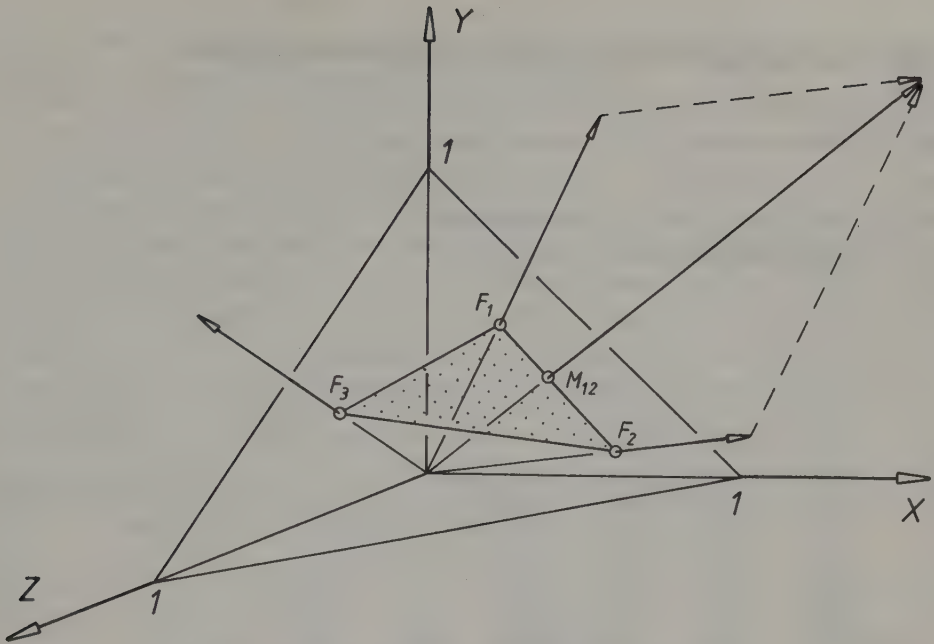


Bild 6.1-10: Additive Farbmischung im Farbraum

Aus den oben abgeleiteten Regeln folgt:

- 1) Wegen der Krümmung des Spektralfarbenzuges lassen sich reine Spektralfarben i.a. nicht durch Mischung erzeugen. Ausgenommen sind jene Farben, die auf dem geraden Bereich zwischen etwa 560 bis 780 nm liegen. Diese sind durch reine Spektralfarben mischbar.
- 2) Alle mischbaren Farben befinden sich innerhalb des zungenförmigen Spektralfarbenzuges. Die Fläche wird durch die Verbindungsgerade zwischen den Endpunkten, die sogenannte Purpurgerade, begrenzt. Die Purpurgerade enthält nur Mischfarben, die keiner monochromatischen Spektralfarbe entsprechen. Außerhalb dieser Geraden kann es keine mischbaren Farben mehr geben. Andere Farbtöne innerhalb der Fläche können durch Mischung endlich vieler Farbkombinationen erhalten werden.<sup>1</sup>
- 3) Es gibt kein farbabbildendes System, das mit drei Grundfarben arbeitet und alle wahrnehmbaren Farben darzustellen vermag. Diese Einschränkung ist jedoch nicht besonders nachteilig, da es möglich ist Grundfarben zu finden, mit welchen die wesentlichsten Farbtöne, die für eine ausgewogene Farbwiedergabe notwendig sind, erzeugt werden können.

<sup>1</sup> Gleiche Farben, die durch Mischung unterschiedlicher Lichtquellen erzeugt werden, können vom menschlichen Auge nicht unterschieden werden. Ihre physikalische Zusammensetzung ist jedoch deutlich verschieden. Solche Farben heißen "bedingt gleich" oder "metamer". Der physikalische Unterschied wird sichtbar, wenn mit solchen Farben Oberflächen mit stark wellenlängenabhängigem Reflexionsverhalten beleuchtet werden.

### Definition einer Lichtquelle und die Bestimmung der Farbörter

Als Lichtquelle ist ein Objekt zu verstehen, welches in einer oder in mehreren Wellenlängen gleichzeitig Strahlung abgibt, wobei es unwichtig ist, ob das Objekt selbst strahlt oder Strahlung reflektiert. Jede Lichtquelle kann durch ihre wellenlängenabhängige Strahlungsenergieverteilung  $Q(\lambda)$  charakterisiert werden (Bild 6.1-11).

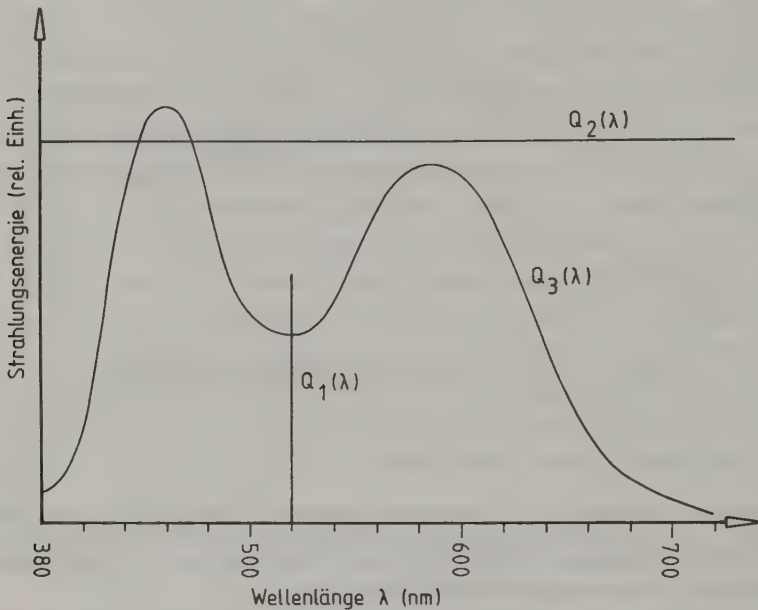


Bild 6.1-11: Strahlungsenergieverteilung verschiedener Lichtquellen

$Q_1(\lambda) = \text{monochromatische Lichtquelle}$

$Q_2(\lambda) = \text{energiegleiches Spektrum, welche über den gesamten sichtbaren Bereich mit konstanter Energie strahlt}$

$Q_3(\lambda) = \text{Lichtquelle mit allg. Energieverteilung}$

Eine spezielle Lichtquelle ist monochromatisches Licht; seine Strahlungsenergie ist auf eine Wellenlänge beschränkt. Ein weiterer Spezialfall ist die Lichtquelle mit energiegleichem Spektrum, welche über den gesamten sichtbaren Bereich mit konstanter Energie strahlt. Bei reflektierenden oder transmittierenden Lichtquellen errechnet sich die Strahlungsenergieverteilung  $Q'(\lambda)$  aus der Energieverteilung  $Q(\lambda)$  der strahlenden Lichtquelle multipliziert mit dem spektralen Reflexionsgrad  $\rho(\lambda)$  bzw. spektralen Transmissionsgrad  $\tau(\lambda)$  des reflektierenden bzw. transmittierenden Objektes, d.h. z.B.  $Q'(\lambda) = Q(\lambda) \cdot \rho(\lambda)$  (siehe Abschnitte 2.5 und 3.1.1.4.1).

Um die vom Menschen wahrgenommene Energieverteilung festzustellen, müssen für jede Wellenlänge die Werte  $Q'(\lambda)$  mit den Normspektralwerten  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,

$\bar{z}(\lambda)$  multipliziert und die Produkte aufsummiert werden. Für die Normfarbwerte  $X, Y, Z$  des wahrgenommenen Lichtes gilt dann:

$$\begin{aligned} X &= \int \bar{x}(\lambda) \cdot Q'(\lambda) d\lambda \\ Y &= \int \bar{y}(\lambda) \cdot Q'(\lambda) d\lambda \\ Z &= \int \bar{z}(\lambda) \cdot Q'(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (6.1-3)$$

Die Farbe einer Lichtquelle entsteht also durch additive Mischung aller beteiligten Spektralfarben. Durch die bekannte Normierung von  $X, Y, Z$  erhält man die Farbwertkoordinaten  $x, y, z$ . Der Farbwert der gegebenen Lichtquelle ist damit festgelegt. Für die energiegeliche Lichtquelle ( $Q_2(\lambda)$  im Bild 6.1-11) erhält man als Farbwert den Schwerpunkt des Farbdreieckes, den Punkt des idealen Weiß.

Zahlenbeispiel: Von einer selbst strahlenden Lichtquelle (d.h.  $\rho(\lambda)=1$ ) sei folgende Energieverteilung  $Q(\lambda)$  zahlenmäßig gegeben (entspricht der Kurve  $Q_3(\lambda)$  in Bild 6.1-11) (die  $Q$ -Werte sind relative Einheiten):

$\lambda$	$Q$	$\lambda$	$Q$	$\lambda$	$Q$	$\lambda$	$Q$	$\lambda$	$Q$
380	0.07	460	0.73	540	0.77	620	0.43	700	0.02
400	0.23	480	0.52	560	0.86	640	0.23	720	} 0.00
420	0.80	500	0.45	580	0.84	660	0.09		
440	1.00	520	0.55	600	0.64	680	0.05	780	

Da die Funktionswerte eng genug gegeben sind, kann das Integral (6.1-3) durch eine Summation ersetzt werden. Man bildet also die Summen  $X = \sum \bar{x}(\lambda) \cdot Q(\lambda)$ ,  $Y = \sum \bar{y}(\lambda) \cdot Q(\lambda)$  und  $Z = \sum \bar{z}(\lambda) \cdot Q(\lambda)$  für die oben angegebenen Wellenlängen. (Die Werte für die Normspektralwerte entnehme man der Tabelle im Anhang 6.1-1). Man erhält:  $X = 3.430$ ,  $Y = 3.614$  und  $Z = 4.107$ . Nach Normierung erhält man die Koordinaten des Farbwertes der Lichtquelle:  $x = 0.308$ ,  $y = 0.324$ ,  $z = 0.368$ . Diese Werte lassen erkennen, daß es sich hier um eine weiße Lichtquelle mit leicht bläulichem Stich handelt (Idealweiß wäre 0.333, 0.333, 0.333). Anmerkung: Die gegebene Strahlungscharakteristik ist jene eines Phosphors, wie er für Schwarzweiß-Monitore Verwendung findet.

Aufgabe 6.1-8: Man berechne die drei Farbwerte, die einem RGB-Monitor entsprechen, und zeichne jenen Bereich im Normfarbdiagramm ein, der die mit Hilfe dieses Monitors darstellbaren Farben enthält. Die Strahlungsenergieverteilungen  $Q(\lambda)$  der drei verwendeten Bildschirmphosphore ist in folgender Tabelle (in relativen Einheiten) gegeben:

Phosphor 1: $\lambda$	$Q$	Phosphor 2: $\lambda$	$Q$	Phosphor 3: $\lambda$	$Q$
(blau)		(grün)		(rot)	
400	0.16	480	0.02	560	0.02
420	0.57	500	0.14	580	0.06
440	1.00	520	0.45	600	0.09
460	0.86	540	0.57	620	0.18
480	0.41	560	0.20	640	0.41
500	0.16	580	0.05	660	0.30
520	0.07			680	0.20
540	0.02			700	0.14
				720	0.07
				740	0.02

Die Normalspektralwerte entnehme man der Tabelle im Anhang 6.1-1.

(Lösung:  $(x, y, z)$ :  $B=(0.15, 0.08, 0.78)$ ,  $G=(0.26, 0.69, 0.05)$ ,  $R=(0.65, 0.35, 0)$ )

Für farbmetrische Zwecke ist es wichtig, genormte Lichtquellen zur Verfügung zu haben. Die CIE hat daher eine Anzahl von Normlichtquellen festgelegt. Die Strahlungsenergieverteilungen für die Normlichtarten A (entspricht dem Licht einer Glühlampe mit Wolfram-Fäden), B (entspricht einem mittleren Tageslicht um Mittag) und C (entspricht einem mittleren Tageslicht bei bewölktem Himmel) sind im Bild 6.1-12b angegeben, die Farbörter im Farbdreieck und im Normfarbdiagramm in Tabelle 6.1-12a.

L i c h t a r t	r	g	b	x	y	z
Energiegleiche Lichtqu.	0.33333	0.33333	0.33333	0.33333	0.33333	0.33333
Normlichtart A	0.55255	0.32126	0.12619	0.44757	0.40745	0.14498
Normlichtart B	0.36230	0.34305	0.29465	0.34842	0.35161	0.29997
Normlichtart C	0.28226	0.33326	0.38448	0.31006	0.31616	0.37378

Tab.6.1-12a: Farbörter verschiedener Normlichtarten

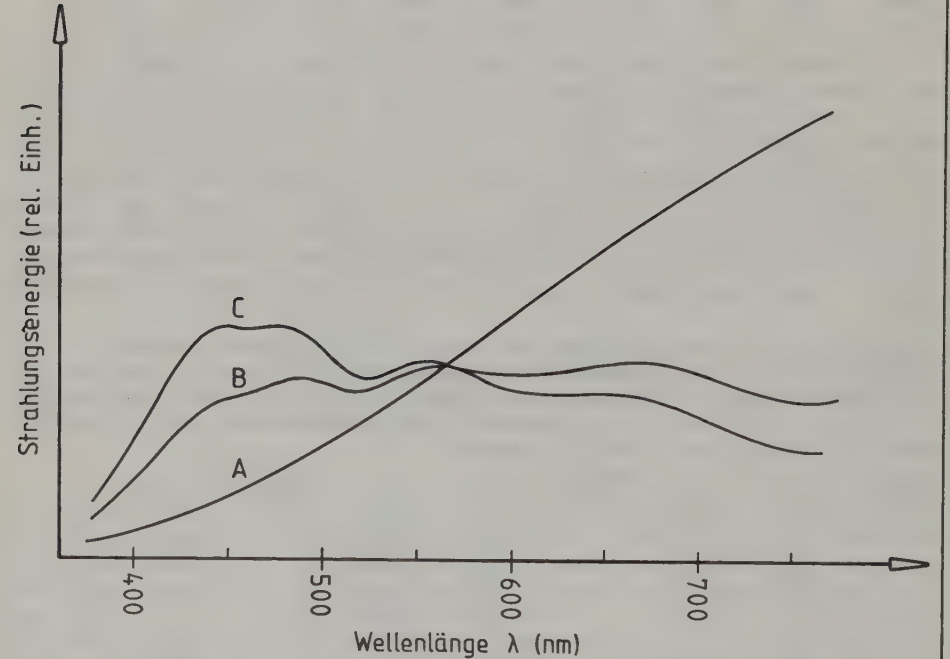


Bild 6.1-12b: Normlichtarten A,B und C  
(Wyszecki und Stiles, 1967)



### Spezielle Farbtransformationen

Betrachtet man die Farbverteilung innerhalb des Normfarbdiagrammes, so kann man anhand des geometrischen Abstandes zweier Farbbörter nicht auf den empfindungsmäßigen Abstand der Farben schließen. Im Bild 6.1-13a sind an ausgewählten Örtern innerhalb des Normfarbdiagrammes Ellipsen eingezeichnet. Sie symbolisieren Linien empfindungsmäßig gleicher Farbdifferenzen gegenüber ihren Mittelpunkten. Die großen Ellipsen im grünen Bereich (= großer y-Wert) zeigen an, daß dort für die Wahrnehmung die Farbdifferenzen gering sind. Im roten und besonders im blauen Bereich lassen sich Farbdifferenzen sehr leicht erkennen. Durch eine Farbtransformation kann man ein Farbdigramm erhalten, das die geometrischen Abstände den empfindungsmäßigen Abstände näherungsweise anpaßt. Bild 6.1-13b zeigt die gleichen Ellipsen im transformierten Farbdigramm, dem sogenannten CIE-UCS-Diagramm (UCS = Uniform Chromaticity Scale). Die Achsen werden zur Unterscheidung mit u und v bezeichnet. Die Transformationsformeln lauten:

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3}$$

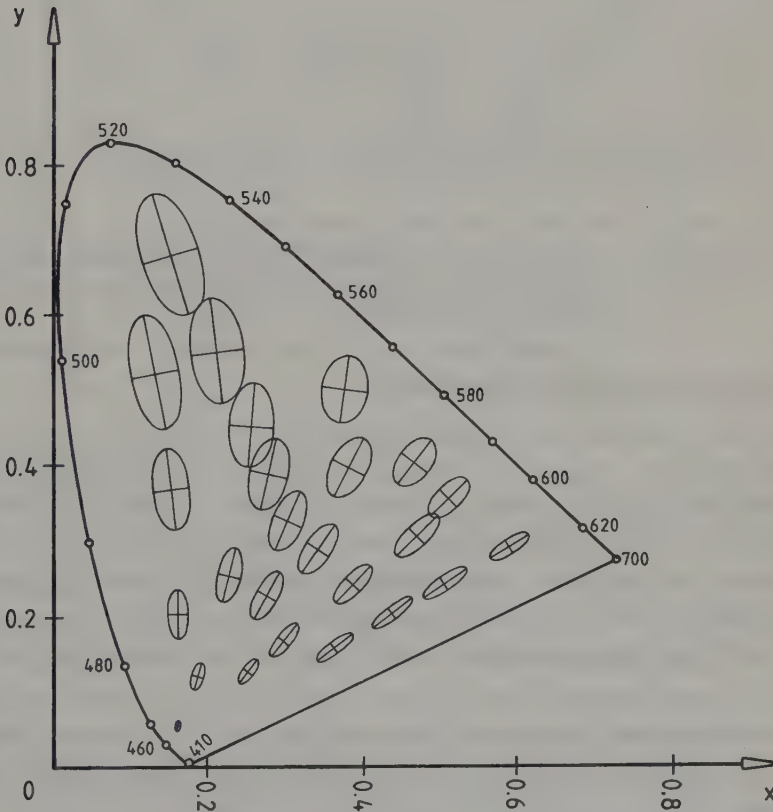


Bild 6.1-13a: CIE-Normfarbdiagramm mit Ellipsen empfindungsmäßig gleichen Farbabstandes für ausgewählte Farbbörter (Wyszecki und Stiles, 1967)

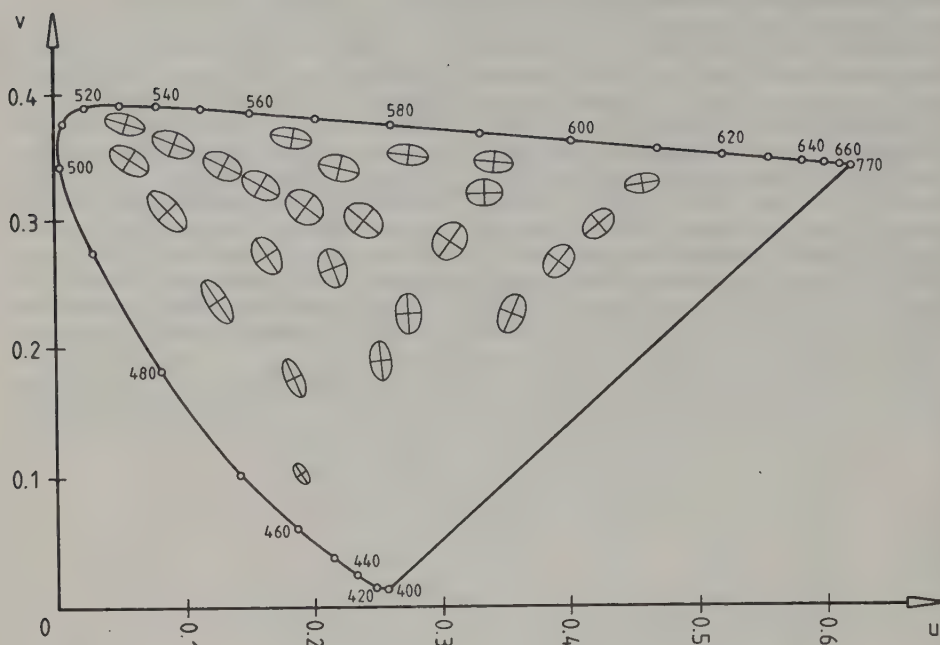


Bild 6.1-13b: CIE-UCS-Farbdigramm mit Ellipsen empfindungsmäßig gleichen Farbabstandes für dieselben Farbörter wie in Bild 6.1-13a (Wysecki und Stiles, 1967)

### Farbörter der Strahlung Schwarzer Körper

Die Strahlung Schwarzer Körper kann ebenfalls als Lichtquelle angesehen und im Normfarbdigramm dargestellt werden. Die Farbörter beschreiben eine Kurve, die eine Funktion der Temperatur des Strahlers ist (Bild 6.1-9). Nach dem Plank'schen Strahlungsgesetz (Kapitel 2.6) verschiebt sich das Strahlungsmaximum mit steigender Temperatur vom infraroten Wellenlängenbereich immer mehr in den sichtbaren Wellenlängenbereich. Bei 6000 K etwa (das entspricht der Oberflächentemperatur der Sonne, die in erster Näherung als Schwarzer Körper angesehen werden kann) ergibt sich im sichtbaren Bereich ein kontinuierlicher und ziemlich flacher Verlauf der Strahlungsenergiekurve. Das beobachtete Licht entspricht nahezu dem einer idealen weißen Lichtquelle.

Zur Charakterisierung einer beliebigen Lichtquelle, deren Farbort auf oder in unmittelbarer Nähe der Farbortkurve der Schwarzen Körper liegt, ver-

wendet man oft den Begriff Farbtemperatur, angegeben in K. Die Farbtemperatur ist eine Kennzahl zur Beschreibung einer Farbe und muß nichts mit der Temperatur des Strahlers, der das Licht aussendet, zu tun haben. Nur im Falle des idealen Schwarzen Körpers sind die Farbtemperatur und Körpertemperatur identisch. Eine Glühlampe kann z.B. durch Vorschalten geeigneter Filter Licht einer Farbtemperatur erzeugen, die von der Temperatur des Glühfadens entscheidend abweicht. Die Normlichtarten A, B und C entsprechen etwa den Farbtemperaturen 2854 K, 4870 K und 6740 K.

Beispiel: Man berechne den Farbtort der Strahlung eines Schwarzen Körpers mit der Temperatur von 3000 K. Die Strahlungswertverteilung des Schwarzen Körpers im Wellenlängenbereich von 380 - 780 nm errechnet man nach dem Planckschen Strahlungsgesetz (2.6-2). Es ist ausreichend, die Strahldichte im Abstand von 20 nm zu berechnen ( $\lambda[\text{nm}], L[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}]$ ):

$\lambda$	L	$\lambda$	L	$\lambda$	L	$\lambda$	L
380	49	480	214	580	464	680	708
400	72	500	260	600	516	700	749
420	100	520	309	620	567	720	787
440	133	540	360	640	617	740	822
460	171	560	412	660	663	760	854
						780	882

$X = \sum L(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda)$ , wobei  $\bar{x}(\lambda)$  der Tabelle der Normspektralwertkurve (Anhang 6.1-1) zu entnehmen ist.

$X = 2389.4$  entsprechend:  $Y = 2210.2$   $Z = 866.6$

Der Farbtort errechnet sich nach der bekannten Normierung (6.1-1):

$x = 0.4371$   $y = 0.4043$   $z = 0.1585$

(Die exakten Werte, errechnet aus dem Integral, wären:

$x = 0.4368$   $y = 0.4041$   $z = 0.1591$ )

### 6.1.1.3 IHS-Systeme

Als IHS-Systeme bezeichnet man alle jene Farbsysteme, die für die Beschreibung einer Farbe die Begriffe Helligkeit (englisch: Intensity, brightness, lightness<sup>1</sup>), Farbton im Farbkreis (englisch: Hue) und Sättigung (englisch: Saturation) verwenden, also polare Farbkoordinaten mit einem Helligkeitsmaß für die dritte Dimension. Der Aufbau dieser Systeme ist zum Teil stark

<sup>1</sup> Diese drei Begriffe werden häufig synonym verwendet. Korrekterweise versteht man unter "intensity" eine physikalisch meßbare Größe, wie etwa die Strahlstärke oder die Lichtstärke. "brightness" und "lightness" sind psychologische Begriffe, definiert als empfundene Helligkeit unter Berücksichtigung umgebender Bedingungen, wobei brightness bei selbstleuchtenden Farben und lightness bei Körperfarben angewandt wird.

unterschiedlich, so wie I, H und S auch unterschiedlich definiert werden. Trotzdem haben solche Systeme in der Praxis der Bildverarbeitung eine gewisse Bedeutung erlangt, da es besonders für einen Ungeübten einfacher ist, eine Farbe durch Angabe dieser Komponenten zu beschreiben als durch die Farbkoordinaten im Farbwürfel oder im Normfarbdiagramm. Es sind auch Bildverarbeitungsverfahren in Verwendung, deren Algorithmen im I,H,S-Farbraum arbeiten.

I, H und S können auch ausgehend vom Normfarbdiagramm bzw. Farbdreieck definiert werden, obwohl diese Definitionen den allgemein üblichen IHS-Systemen nicht zugrunde liegen. Durch die ebene Darstellung der Farbörter im Normfarbdiagramm ist die dritte Größe, die für eine genaue Farbbeschreibung notwendig ist, verloren gegangen. Neben Sättigung und Farbton<sup>1</sup>, die bereits früher definiert wurden und aus dem Farbdiagramm direkt ableitbar sind, eignet sich als dritte Dimension die Helligkeit. Man kann also bei Bedarf eine Helligkeitskoordinate einführen, die senkrecht auf die Diagrammebene aufgetragen wird.

Bei der Ableitung der Normspektralwerte  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  wurde die  $\bar{y}$ -Kurve der Hell-empfindlichkeitskurve des Auges angepaßt. Der Y-Normfarbwert einer bestimmten Farbe (X,Y,Z) ist daher als Helligkeitsmaß direkt geeignet.

Bisher mußte man zwischen farbigen Selbststrahlern und Körperfarben, also durch Reflexion strahlende Objekte, nicht unterscheiden. Durch Einführen des Helligkeitsmaßes ergibt sich jedoch die Notwendigkeit, eine Unterscheidung zu treffen.

Als photometrische Einheit für die Helligkeitsmessung wird die Leuchtdichte [ $\text{cd m}^{-2}$ ] verwendet (Anhang 2.3-2, Band 1). Da die Leuchtdichte nach oben hin theoretisch unbegrenzt ist, kann der Y-Wert bei Selbststrahlern unendlich werden. Es ergibt sich also als Farbkörper, der alle Farben der Selbststrahler enthalten kann, ein dreiseitiges über dem Farbdreieck aufgestelltes Prisma mit unendlicher Höhe (Bild 6.1-14a). Für ein bestimmtes farbabbildendes System ergeben sich aber Maximalwerte. Bild 6.1-14b zeigt

<sup>1</sup> Wie bereits erwähnt, liegen gleiche Farbtöne auf der Verbindungsgeraden vom Weißpunkt zum Farbpunkt. Im CIE-Normfarbdiagramm ist es üblich, den Farbton durch Angabe der farbtongleichen Wellenlänge zu charakterisieren. Sie ergibt sich durch den Schnitt der Geraden mit dem Spektralfarbenzug. Für alle Farbtöne, die in Richtung der Purpurgeraden liegen, der keine Wellenlängen zugeordnet sind, erfolgt die Angabe durch die komplementäre Wellenlänge. Dem Zahlenwert wird dann ein negatives Vorzeichen gegeben.



den Farbkörper, wie er für einen RGB-Monitor typisch ist. (Der Abbildung liegt das Farbdreieck des Monitorsystems zugrunde).

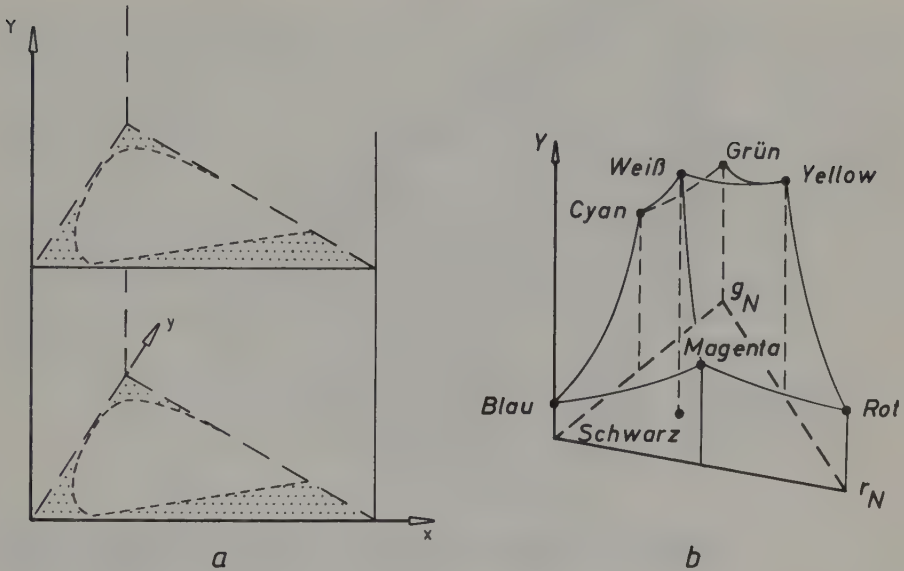


Bild 6.1-14: Farbdreieck mit Helligkeitsachse für selbststrahlende Farben (a) und Farbkörper für RGB-Monitor (b)  
(Schultze, 1975, Pratt, 1978)

Bei Körperfarben wird als Helligkeitswert  $Y$  ein Helligkeitsbezugswert eingeführt, der das Verhältnis der Leuchtdichte des beleuchtenden Lichtes zur Leuchtdichte des reflektierten Lichtes ausdrückt. Es zeigt sich, daß dadurch ein streng begrenzter Farbkörper in Form einer unregelmäßigen Pyramide entsteht. Dieser Körper ist unter dem Namen Farbkörper nach Rössch oder (in der englischsprachigen Literatur) nach MacAdam bekannt. Bild 6.1-15 zeigt ein Isolynchenbild<sup>1</sup> dieses Körpers über dem Normfarbdiagramm bei Beleuchtung mit weißem Licht der Normlichtart C. Der maximale  $Y$ -Wert kann nur in einem Punkt, dem Farbort des C-Lichtes, erreicht werden. Je niedriger der  $Y$ -Wert, umso mehr Farben können in diese Helligkeitskategorie fallen.

<sup>1</sup> Als Isolynchen bezeichnet man Linien gleicher Leuchtdichte

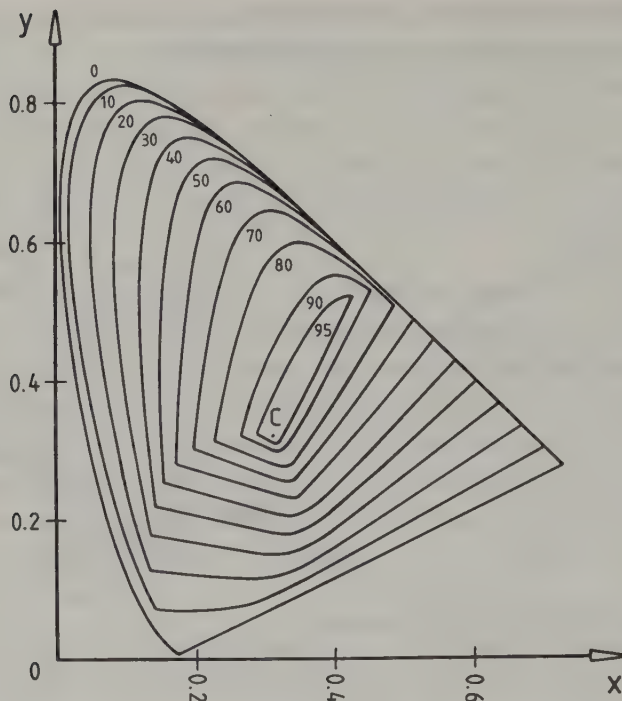


Bild 6.1-15: Farbkörper nach Rösch für Körperfarben für Beleuchtung mit Normlicht C (Wyszecki und Stiles, 1967) (Y-Wert bezogen auf Weiß des C-Lichtes = 100%)

Diese eben besprochenen Farbsysteme sind physiologisch bzw. physikalisch ableitbar. Die im folgenden vorgestellten Systeme sind rein vorstellungsmäßige, die mit den physiologischen Gesetzen nur mehr entfernt zu tun haben. Für alle diese Systeme gibt es mathematische Formeln, mit denen R,G,B-Koordinaten in I,H,S-Koordinaten umgewandelt werden können und umgekehrt. Diese Transformationsformeln beschreiben nicht Transformationen des Farbraumes in dem früher besprochenen Sinn. Wie man anhand der R,G,B-Werte zu H- und S-Werte gelangen könnte, soll beispielhaft im folgenden kurz abgeleitet werden.

Die IHS-Systeme bauen auf der Farbkreisfläche auf. Es sind dies jene Farben, die auch in der Farbdreiecksfläche vorhanden sind. Der Radius des Kreises wird mit 1 angenommen und entspricht maximaler Sättigung. Der Mittelpunkt des Kreises ist der Weißpunkt mit Sättigung 0. Die Farbe entlang des Kreisumfanges bestimmt den Farbton, die Richtung des Vektors vom Kreismittelpunkt zu einem Farbpunkt innerhalb des Kreises ist damit charakteristisch für den Farbton. Der Farbkreis entspricht also einem zu einem Kreis umgeformten Farbdreieck (vergl. Bild 6.1-3).

Ausgehend vom Farbdreieck lassen sich daher auch die Formeln für die Sättigung  $S$  und den Farbton  $H$  ableiten. Aus den Verhältnissen im gleichseitigen Dreieck ergibt sich für die Sättigung (laut Definition):

$$S = 1 - 3 \cdot \text{Minimum}(r, g, b)$$

$H$ , als ein vom Schwerpunkt aus gemessenes Azimut, wird in Winkelgraden von 0 bis 360 angegeben. Nullrichtung und Drehsinn können frei angenommen werden. In der Folge soll Blau  $\hat{=}$  0, Cyan  $\hat{=}$  60, Grün  $\hat{=}$  120, Yellow  $\hat{=}$  180, Rot  $\hat{=}$  240 und Magenta  $\hat{=}$  300 gelten. Das Azimut darf auch als eine Strecke, gemessen entlang des auf 360 normierten Dreiecksumfangs, betrachtet werden. Da als Ausgangssystem für die IHS-Transformation i.a. der Farbwürfel gegeben ist, ist es vernünftiger, den Würfeläquator (d.h. die nicht den Schwarz- bzw. Weißpunkt enthaltenden Kanten) auf 360 zu normieren, die Projektion eines Punktes von der Dreiecksseite auf die Würfelkante zu berechnen und die Strecke entlang des Würfeläquators als  $H$ -Wert anzugeben. Auf Grund einfacher Proportionen im gleichseitigen Farbdreieck und den bereits bekannten Formeln für die Rückrechnung der  $r, g, b$ -Koordinaten in  $R, G, B$ -Werte erhält man:

$$H = \begin{cases} 60 \cdot (6 + (g-r)/(S-|g-r|)) & \text{für } b = \text{Maximum}(r, g, b) \\ 60 \cdot (2 + (r-b)/(S-|r-b|)) & \text{für } g = \text{Maximum}(r, g, b) \\ 60 \cdot (4 + (b-g)/(S-|b-g|)) & \text{für } r = \text{Maximum}(r, g, b) \end{cases}$$

$$\text{für } H \geq 360 \text{ gilt } H = H \bmod 360$$

Zahlenbeispiel:  $R = 175, G = 12, B = 210$  mit  $R, G, B \in [0, 255]$

Im Farbdreieck erhält man:  $r = 0.441, g = 0.030, b = 0.530$ .

$g = \text{Minimum}, b = \text{Maximum}$ ; es gilt daher:

$$S = 1 - 3 \cdot 0.030 = 0.91$$

$$H = 60 \cdot (6 + (0.030 - 0.441)/(0.91 - 0.441 + 0.030)) = 314$$

Es handelt sich hier um eine Farbe mit Magentafarbtönen und ziemlich hoher Sättigung.

Wie aus den Formeln leicht zu erkennen ist, wird für  $r=g=b$  und damit auch für  $R=G=B$  die Sättigung 0 und der Farbton unbestimmt. Mit anderen Worten:

- ein Punkt auf der Graudiagonale des Würfels hat keine Sättigung
- für einen Grauton kann kein eindeutiger Farbton angegeben werden.

Die angegebenen Formeln sollen nur einen Weg darstellen, wie man von den  $R, G, B$ -Werten auf die polare  $H, S$ -Darstellung gelangen kann. Es wären auch noch Überlegungen anzustellen, auf welche Weise man zu einem Helligkeitswert  $I$  gelangen könnte. Im folgenden sollen einige übliche IHS-Farbkörper vorgestellt werden. Die dafür verwendeten Transformationsformeln werden nicht näher abgeleitet.

### Farbzyylinder

Senkrecht auf die Fläche des Farbkreises, dessen Mittelpunkt die Sättigung  $S=0$  und dessen Peripherie die Sättigung  $S=1$  hat, wird die Helligkeitskomponente  $I$  aufgetragen. Es entsteht ein Zylinder, dessen Grundfläche dem Wert  $I=0$  und dessen Deckfläche dem Wert  $I=1$  entspricht. Der Wert für  $I$  hat mit dem Y-Normfarbwert nichts zu tun. Man geht einfach davon aus, daß  $I=0$  Schwarz und  $I=1$  größte Helligkeit bedeutet. Der Farbton wird als ein im Kreismittelpunkt gemessener Richtungswinkel angegeben (die Null-Richtung sei, frei gewählt, wieder mit Blau definiert). Flächen gleicher Sättigung bilden konzentrische Zylindermäntel. Flächen gleicher Helligkeit sind zur Boden- und Deckfläche parallele Kreisflächen, Flächen gleichen Farbtönen sind vertikale Ebenen, die von der Zylinderachse, einer Zylindererzeugenden

und der Deck- und Bodenfläche begrenzt werden. (Bild 6.1-16).

a) Farbzyylinder 1

Die Bodenfläche mit  $I=0$  entspricht Schwarz; in ihr ist weder Farbton noch Sättigung eindeutig definiert: d.h. alle Farbtöne in allen Sättigungsgraden ergeben bei  $I = 0$  schwarz. Die Deckfläche mit  $I=1$  enthält an der Peripherie die Farbkreisvollfarben. Im Mittelpunkt liegt Weiß. Die Deckfläche besteht also aus den Farben jener Würfel Flächen, die den Weißpunkt enthalten. Auf dem Zylindermantel liegen die Farben jener Würfel Flächen, die den Schwarzpunkt enthalten. Die Zylinderachse entspricht der Würfeldiagonale Schwarzpunkt-Weißpunkt und enthält den Graukeil.

b) Farbzyylinder 2

Die Bodenfläche mit  $I=0$  entspricht wieder Schwarz, die Deckfläche mit  $I=1$  entspricht Weiß. In beiden Flächen ist weder Farbton noch Sättigung eindeutig definiert. Weiß ist also die einzige Farbe, die volle Helligkeit erreichen kann. Der Farbkreis mit den Vollfarben an der Peripherie (=Farben des Würfeläquators) liegt in der Mitte des Zylinders bei  $I=0.5$ . Die obere Hälfte des Zylindermantels enthält alle Farben der Würfel Flächen mit dem Weißpunkt (= verweißlichte Farben), die untere Hälfte alle Farben der Würfel Flächen mit dem Schwarzpunkt (= abgedunkelte Farben).

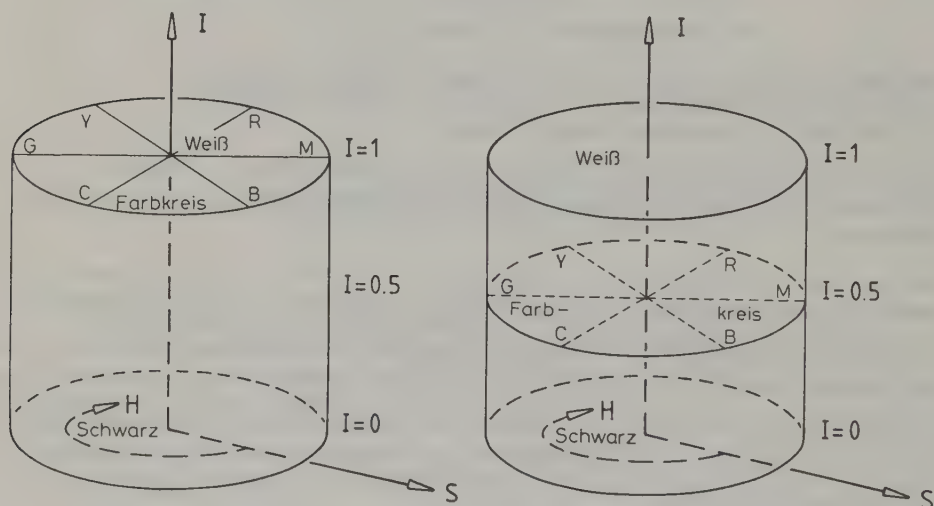


Bild 6.1-16: IHS-Farbzyylindermodelle

### Farbkegel

Das Modell des Farbkegels entsteht dadurch, daß Kreisflächen, die nur eine einzige Farbe enthalten, durch einen Punkt repräsentiert werden können. Das Kegelmodell läßt sich also unmittelbar aus dem Zylindermodell ableiten.

a) Farbkegel 1 ( $\hat{=}$  modifizierter Farbzyylinder 1)

Die Bodenfläche des Zylinders mit  $I=0$  wird zum Schwarzpunkt und damit zur Kegelspitze. Die Deckfläche bleibt als Kreisfläche erhalten. Man erhält somit einen auf der Spitze stehenden Farbkegel. Der Kegelmantel entspricht dem Sättigungswert 1. Das heißt aber, daß der Radius  $r$  einer



Kreisfläche nicht mehr unmittelbar als Sättigungswert genommen werden kann. Der Farbkörper hat also die drei Koordinaten  $I$ ,  $H$  und  $r$  mit  $r=f(I,S)$ .

Die Ableitung des Farbkegels aus dem Farbwürfel ist ähnlich zu verstehen wie jene des Farbdreiecks. Steht ein Betrachter im Schwarzpunkt des Würfels und blickt in Richtung des Weißpunktes, so entsprechen die ihm gegenüberliegenden Würfelflächen der Kegeldeckfläche, die ihn umgebenden Würfelflächen dem Kegelmantel.

b) Farbkegel 2 = Farbdoppelkegel ( $\hat{=}$  modifizierter Farbzyylinder 2)

Als Kegelgrundfläche wird die Kreisfläche mit  $I=0.5$  verwendet. Die Flächen mit  $I=1$  und  $I=0$ , die beide nur eine einzige Farbe enthalten, werden zu Kegelspitzen. Man erhält einen Farbdoppelkegel, dessen Mäntel die Sättigung  $S=1$  haben. Auch in diesem Doppelkegel gilt, daß die Sättigungswerte nicht mehr gleich den Kreisradien sind. Die Farbkörperkoordinaten lauten daher wieder  $I, H, r$  mit  $r = f(I, S)$ .

Der Doppelkegel läßt sich sehr anschaulich aus dem Farbwürfel ableiten. Der Würfel wird so aufgestellt, daß seine Graudiagonale lotrecht steht. Der Würfeläquator wird in einen Kreis umgeformt. Die Würfelflächen, die den Weißpunkt enthalten, werden zum Mantel des oberen Kegels, jene, die den Schwarzpunkt enthalten, zum Mantel des unteren Kegels.

Dieser Übergang scheint zwar logisch, die Sättigungsdefinition steht aber im Gegensatz zu der bisher verwendeten. Der obere Kegelmantel enthält alle Farben, die auch im Farbdreieck vorhanden sind. Diese Farben haben nach der bisherigen Definition, je nach ihrem Abstand zum Mittelpunkt, Sättigungswerte von 0 bis 1. Im Falle des Doppelkegels haben diese Farben aber alle, da sie auf dem Kegelmantel liegen, die Sättigung 1. Das Doppelkegelmodell kommt aber dem visuellen Helligkeitseindruck näher, da verweißlichte Farben heller wirken als Vollfarben. Um die Sättigung der früheren Definition anzupassen, könnte für den oberen Kegelmantel definiert werden, daß mit zunehmender Helligkeit die maximal mögliche Sättigung abnimmt. Man müßte sich dann jedoch bewußt sein, daß die  $I$ -,  $H$ - und  $S$ -Werte nicht mehr in allen Kombinationen ihres Wertebereiches auftreten dürfen. Solche Einschränkungen sind in der Praxis der Bildverarbeitung sehr unbequem, da bei Verarbeitung eines Wertes immer das gesamte Wertetripel  $(I, H, S)$  beachtet werden müßte. Das Modell des Doppelkegels, wie es hier aufgestellt wurde, ist weit verbreitet, obwohl es die bekannten Begriffe von Helligkeit und Sättigung nicht einwandfrei realisiert.

Es ist zu beachten, daß die sogenannten IHS-Systeme nicht einheitlich und allgemeingültig definiert sind. Dasselbe gilt auch für die Umrechnungsformeln zwischen IHS und RGB. Bei der Definition des Farbtons kommt, wie bereits früher erwähnt, noch hinzu, daß Nullpunkt und Drehsinn beliebig angenommen werden können. Man kann daher IHS-Werte verschiedenen Ursprungs nicht ohne weiteres miteinander vergleichen. Transformationsformeln, die RGB-Würfelkoordinaten in IHS-Koordinaten umwandeln und umgekehrt, sind im Anhang 6.1-2 zu finden.

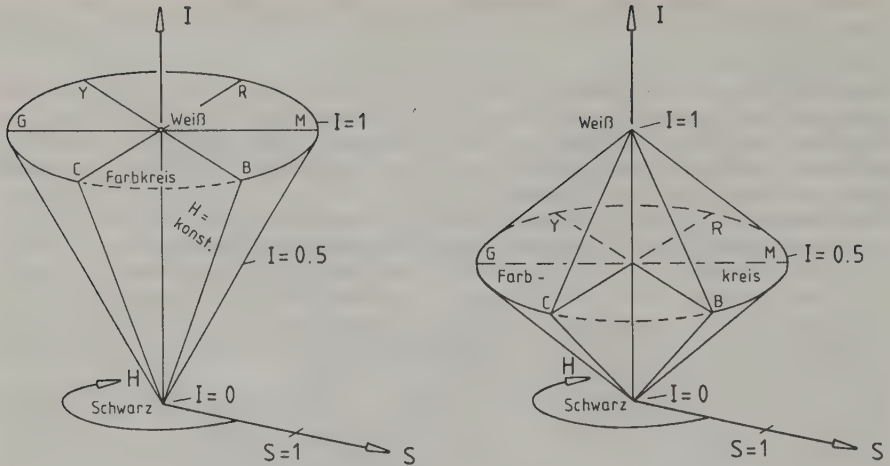


Bild 6.1-17: IHS-Farbkegelmodelle

#### Anwendungsbeispiel für die IHS-Transformation:

Die IHS-Transformation findet unter anderem Anwendung bei der Kombination von TM- mit SPOT-Daten (siehe Kapitel 4.2.3 und 4.2.9). Die geometrische Auflösung des TM liegt bei 30 m, eine Größenordnung, die in kleinstuktureierten Gebieten für eine gute Interpretation nicht ausreichend ist. Der panchromatische Kanal von SPOT bietet dagegen eine Auflösung von 10 m und ist daher selbst für die Darstellung von Stadtgebieten noch verwendbar. Um die spektralen Vorteile des TM mit der hohen geometrischen Auflösung des SPOT zu verbinden, kann man, neben anderen Methoden, auch die IHS-Transformation heranziehen.

Mit Hilfe einer geometrischen Rektifizierung (6.4) werden zuerst die beiden Datensätze aufeinander transformiert, sodaß die TM- und die SPOT-Bildelemente ineinander zugeordnet werden können. Als (Resampling-)Intervall der rektifizierten Bilder ist in beiden Fällen 10 m zu verwenden. Jedes TM-Pixel (30 x 30 m) wird dadurch in 9 Pixel zu 10 x 10 m zerlegt, von denen jedes je einem SPOT-Pixel zugeordnet werden kann. Man wählt dann drei TM-Kanäle für eine gewünschte RGB-Farbdarstellung aus. Diese werden mit Hilfe der IHS-Transformation in I-, H- und S-Kanäle umgewandelt. Der I-Kanal zeigt die Helligkeitsverteilung innerhalb des Farbbildes und ist damit dem panchromatischen SPOT-Kanal verwandt. Ersetzt man nun den I-Kanal durch das SPOT-Bild und führt die inverse IHS-Transformation durch, so erhält man ein RGB-Bild mit der hohen SPOT-Auflösung. Dabei bewirken die Grauwerte des SPOT-Bildes unterschiedliche Helligkeiten auch innerhalb der einzelnen TM-Pixel, womit - unter Beibehaltung des Farbtones und der Sättigung - die Detailwiedergabe von SPOT erreicht wird. Dieser Tausch ist eigentlich nur dann gerechtfertigt, wenn der I-Kanal der panchromatischen Charakteristik entspricht, das heißt, wenn er die Helligkeitsverteilung über das gesamte sichtbare Spektrum repräsentiert. Genaugenommen ist dies nur dann der Fall, wenn die drei sichtbaren TM-Kanäle (1 = blau, 2 = grün, 3 = rot) für die Darstellung eines Echtfarbbildes verwendet werden.

Weiterführende Literatur: (MacAdam, 1985), (Pratt, 1978), (Regler, 1974), (Schultze, 1975), (Wyszecki und Stiles, 1967).

### 6.1.2 Definition eines digitalen Bildes

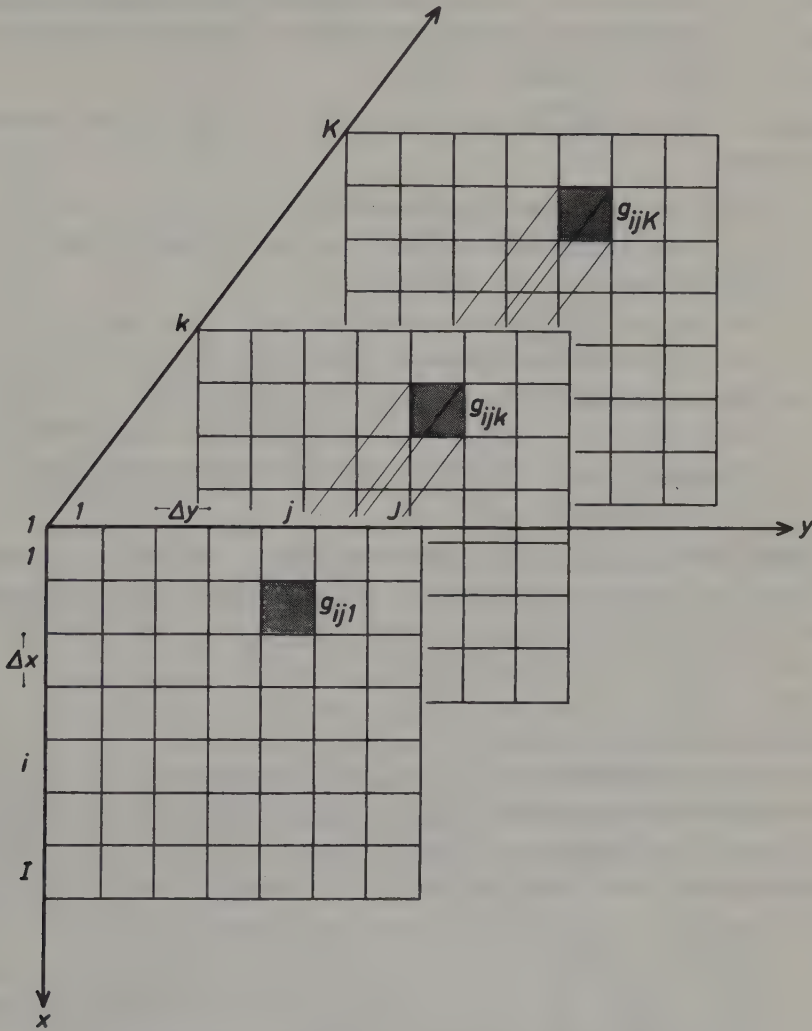


Bild 6.1-18: Definition eines digitalen Bildes

Ein digitales Bild, insbesondere ein digitales Multispektralbild (Bild 6.1-18), besteht aus einzelnen Bildelementen<sup>1</sup>  $g_{ijk}$ , die in einer dreidimensionalen Matrix  $\underline{G}$  angeordnet sind. Die Bildelemente sind in der  $xy$ -Ebene zweidimensional angeordnet; die dritte Dimension entspricht der Anzahl  $K$  der Spektralbereiche bzw. Kanäle bzw. Bänder.

<sup>1</sup> Dafür ist auch das Kunstwort Pixel ( $\hat{=}$  picture x element) gebräuchlich.

Die Bildkoordinaten  $x$  und  $y$  der einzelnen Bildelemente ergeben sich aus den Indizes  $i = 1(1)I^1$  und  $j = 1(1)J$  multipliziert mit den Bildelementgrößen  $\Delta x$  und  $\Delta y$ . Wegen der endlichen Größen  $\Delta x$  und  $\Delta y$  spricht man nicht von einem Bildpunkt, sondern von einem Bildelement.

Abhängig von der Anzahl der Kanäle haben die digitalen Bilder folgende Bezeichnungen:

- $K = 1$ : Schwarzweißbild oder monochromatisches Bild, wobei offen ist, ob es ein panchromatisches Bild oder ein Thermalbild oder ein digital verarbeitetes RADAR-Bild etc. ist.
- $K = 3$ : Farbbild, wobei offen ist, ob es ein Farbbild mit natürlichen Farben oder ein Farbinfrarotbild etc. ist.
- $K > 3$ : Multispektralbild z.B. die 11 Kanäle des Multispektralabtasters AADS 1268 (Tab. 3.2-19) oder RADAR-Bilder mit unterschiedlicher Frequenz, unterschiedlicher Polarisierung, unterschiedlichem Depressionswinkel.

Die Bildelemente  $g_{ijk}$  sind die Informationsträger. Ihre Werte variieren abhängig vom Bildaufzeichnungsgerät bzw. vom verwendeten Computer zwischen

$$0 \dots 255 = 0 \dots (2^8 - 1) = 8 \text{ Bits} = 1 \text{ Byte}$$

$$0 \dots 127 = 0 \dots (2^7 - 1) = 7 \text{ Bits}$$

$$0 \dots 63 = 0 \dots (2^6 - 1) = 6 \text{ Bits}$$

Der verfügbare Wertebereich wird dabei dem Dynamikbereich der gesamten relevanten Information angepaßt (Bild 6.1-19). Vorherrschend ist zur Zeit die 8bit-Darstellung; Computer mit einer auf Bytes ( $\hat{=} 8$  Bits) aufbauenden Wortstruktur eignen sich deshalb sehr gut für die digitale Bildverarbeitung.

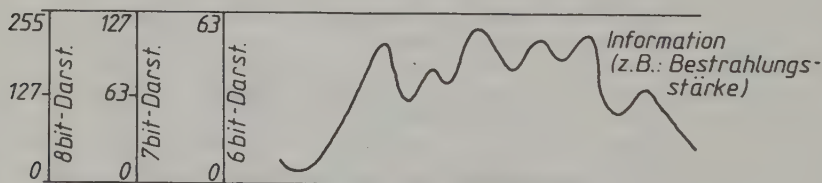


Bild 6.1-19: Wertebereich und Dynamikbereich der relevanten Information

<sup>1</sup>  $i = 1(1)I$  bedeutet:  $i$  läuft von 1 beginnend in Stufen von 1 bis  $I$ .



Zahlenbeispiele für Werte von Bildelementen:

Dezimal	Oktal	Hexadezimal	binär(= bit-Muster)
0	000	00	00000000
1	001	01	00000001
2	002	02	00000010
.	.	.	.
.	.	.	.
127	177	7F	01111111
128	200	80	10000000
.	.	.	.
.	.	.	.
254	376	FE	11111110
255	377	FF	11111111

Tab.6.1-20: Verschiedene Zahlendarstellungen von Bildelementwerten

Bei Schwarzweißbildern sind die Bildelementwerte die Grauwerte (meistens ist  $0 \hat{=}$  schwarz und 255 bzw. 127 bzw. 63  $\hat{=}$  weiß). In diesem Fall läßt man den dritten Index weg, d.h. man schreibt  $g_{ij}$ . Bei Farbbildern sind die Bildelementwerte die Farbwerte in den drei Grundfarben R,G,B oder die Koordinaten in einem anderen Farbkoordinaten-System, wie z.B. das IHS-System. Bei Multispektralbildern, die auch von passiven Mikrowellensystemen stammen können, sind es die Informationen in den verschiedenen Spektralbereichen (meistens  $0 \hat{=}$  keine Strahlung und 255 bzw. 127 bzw. 63  $\hat{=}$  Maximalstrahlung). Unabhängig von der Anzahl der Spektralbereiche hat sich für die Werte der Bildelemente  $g_{ijk}$  die Bezeichnung Grauwerte durchgesetzt, obwohl diese Bezeichnung nur bei Schwarzweißbildern berechtigt wäre. Bei RADAR-Bildern sind die Grauwerte ein Maß für das empfangene Echo in einer bestimmten Frequenz, mit einer bestimmten Polarisierung und einem bestimmten Depressionswinkel.

## 6.2 Entstehung digitaler Bilder

Einige Aufnahmeverfahren, die digitale Bilder erzeugen, haben wir bereits kennengelernt: Rotationsabtaster für Flugzeuge (Tab. 3.2-3 und Tab. 3.2-19) liefern im allgemeinen digitale Bilder in 2 bis 11 Kanälen. Die Anzahl der Bildelemente in einer Zeile beträgt etwa 700. Die Rotationsabtaster in Satelliten (4.2.2 bzw. 4.2.3) liefern 5 bzw. 7 Kanäle. Die x- bzw. y-Dimension der Bilder beträgt einige tausend Bildelemente.

Die digitale Zeilenkamera (3.2.2) liefert z.Z. nur Bilder in wenigen Kanälen, aber mit einer Anzahl von Bildelementen in der Größenordnung von mehreren Tausend (4.2.7 und 4.2.9). Neue Konstruktionsprinzipien (3.2.2) erlauben eine Erhöhung der Kanalanzahl auf einige Hundert, wobei dann die Anzahl der Bildelemente in einer Zeile reduziert werden muß.

Die passiven Mikrowellensysteme (3.4.2) liefern eine geringe Anzahl von Bildelementen; auch die dritte Dimension dieser digitalen Bilder ist nicht sehr vielfältig. Dagegen haben RADAR-Bilder (3.4.3) eine geometrische Auflösung und damit eine Bildelementanzahl, die den Abtastern vergleichbar ist.

Benutzt man als Fernerkundungssensoren photographische Systeme (3.1), so können die in den Photographien fixierten Informationen erst nach einer Digitalisierung den Möglichkeiten der digitalen Bildauswertung zugeführt werden. Eine abschnittsweise Digitalisierung im photogrammetrischen analytischen Auswertegerät haben wir bereits im Kapitel 5.1.4.2 angesprochen. Die Digitalisierung des gesamten photographischen Bildes geschieht in der Regel mittels Abtastung. Die dafür notwendigen Geräte bezeichnet man als Photoabtaster, aber auch als Photoscanner oder Bildlesegerät oder Bilddigitalisierer. Das Prinzip eines Photoabtasters ist im Bild 6.2-1 skizziert.

Die Photographie wird auf eine Trommel gespannt, die sich kontinuierlich in y-Richtung dreht und nach einer Umdrehung einen Sprung in x-Richtung von  $\Delta x$  durchführt. An einem in Richtung der Trommelachse verschiebbaren Rahmen sind die Lichtquelle A für Auflicht (Vorlage ist ein Papierbild), die Lichtquelle D für Durchlicht (Vorlage ist ein Film) und der Detektor montiert. Die (weißen) Lichtquellen A bzw. D leuchten gleichmäßig. Das vom Detektor abgegebene elektrische Signal variiert abhängig vom Grauwert des beleuchteten Bildelementes. Das elektrische Signal wird nach einer Verstärkung digitalisiert und auf ein computerkompatibles Magnetband (CCT) geschrieben. Diese Methode ähnelt sehr den Rotationsabtastern, die in Flugzeugen und Satelliten eingebaut werden (3.2.1). Dort tastet man die Erdoberfläche direkt ab; beim Photoabtaster wird das photographische Bild abgetastet, das vorher vom Flugzeug oder vom Satelliten aus aufgenommen wurde.

Einige technische Daten des Optronics C4500, eines weit verbreiteten Photoabtasters: Bildformat 23x23 cm. Bildelementgröße einstellbar auf 25x25  $\mu\text{m}$ , 50x50  $\mu\text{m}$  oder 100x100  $\mu\text{m}$ . Die Digitalisierung eines Bildes dauert, abhängig von der Bildelementgröße, 78, 20 oder 10 Minuten.

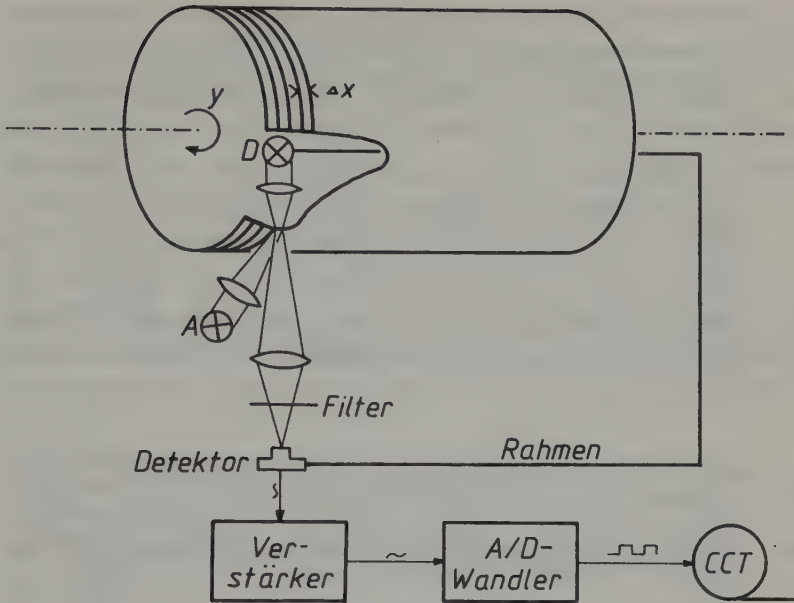


Bild 6.2-1: Photoabtaster ( $A \hat{=}$  Lichtquelle für Auflicht,  
 $D \hat{=}$  Lichtquelle für Durchlicht)

Werden mit dem Photoabtaster (Bild 6.2-1) farbige Bilder digitalisiert, zieht man vor dem Detektor ein Filter ein. Dadurch bekommt man - abhängig von der Filterfarbe - den jeweiligen Farbauszug. Durch Auswechseln der Filter und Wiederholung der Abtastung des Bildes entstehen auf diese Weise die drei Farbauszüge.

Der Weg vom weißen Mischlicht der Lichtquelle D (Bild 6.2-1) bis zum registrierten Farbwert ist im Bild 6.2-2 erläutert, wobei die Überlegungen des Abschnittes 3.1.1.4.1 herangezogen werden. Die verwendeten Filter und das zu digitalisierende Photo sollen für die folgenden Erläuterungen in den einzelnen Spektralbereichen nur extreme Transmissionswerte (0 oder 1) aufweisen.

Lichtquelle	weiß (=blau+grün+rot)					
Photographie	blau -grün -rot	grün -blau -rot	gelb -blau	rot -blau -grün	weiß	schwarz -blau -grün -rot
Rotfilter	-blau -grün					
	-blau -grün -rot ↓ schwarz	-blau -grün -rot ↓ schwarz	-blau -grün ↓ rot	-blau -grün ↓ rot	-blau -grün ↓ rot	-blau -grün -rot ↓ schwarz
Detektor (Grauwerte 0-255)	0	0	255	255	255	0

Abtastung mit Rotfilter

Lichtquelle	weiß (=blau+grün+rot)					
Photographie	blau -grün -rot	grün -blau -rot	gelb -blau	rot -blau -grün	weiß	schwarz -blau -grün -rot
Grünfilter	-blau -rot					
	-blau -grün -rot ↓ schwarz	-blau -rot ↓ grün	-blau -rot ↓ grün	-blau -grün -rot ↓ schwarz	-blau -rot ↓ grün	-blau -grün -rot ↓ schwarz
Detektor	0	255	255	0	255	0

Abtastung mit Grünfilter

Lichtquelle	weiß (=blau+grün+rot)					
Photographie	blau -grün -rot	grün -blau -rot	gelb -blau	rot -blau -grün	weiß	schwarz -blau -grün -rot
Blaufilter	-grün -rot					
	-grün -rot ↓ blau	-blau -grün -rot ↓ schwarz	-blau -grün -rot ↓ schwarz	-blau -grün -rot ↓ schwarz	-grün -rot ↓ blau	-blau -grün -rot ↓ schwarz
Detektor	255	0	0	0	255	0

Abtastung mit Blaufilter

Bild 6.2-2: Abtastung einer Farbphotographie mit einem Rot-, Grün-, und Blaufilter, dargestellt an Bildstellen in den drei additiven Grundfarben und an einer Bildstelle mit der Mischfarbe Gelb sowie an schwarzen und weißen Bildstellen.



Wir beginnen mit der Abtastung, bei der ein Rotfilter eingezogen wurde. Das auf den Film treffende weiße Licht wird - abhängig von der Farbe der Bildstelle - zerlegt. Z.B. ist eine blaue Bildstelle für den Blauanteil transparent; die Grün- und Rotanteile werden - im Idealfall - absorbiert. Eine Bildstelle mit der Mischfarbe Gelb ist - im Idealfall - transparent für Grün und Rot; Blau, die Komplementärfarbe, wird absorbiert. Das eingezogene Rotfilter ist transparent für Rot und absorbiert Blau und Grün, sodaß die blauen und grünen Bildstellen für den Detektor schwarz (Grauwert = 0) erscheinen und die roten und gelben Bildstellen mit der größten Strahlungsintensität (Grauwert = 255) festgehalten werden. Bei Filmfarben mit geringerer Sättigung tritt anstelle des Grauwertes 255 ein entsprechend kleinerer Wert auf.

Die zweite Abtastung geschieht mit einem Grünfilter. In diesem Fall lauten die Grauwerte (Bild 6.2-2): Blau = 0, Grün = 255, Gelb = 255 und Rot = 0. Die dritte Abtastung mit einem Blaufilter liefert: Blau = 255, Grün = 0, Gelb = 0 und Rot = 0.

Das Ergebnis der Digitalisierung mit den drei Filtern ist unabhängig davon, ob ein auf Film vorhandenes photographisches Bild mit Durchlicht abgetastet oder ein Papierbild vorliegt und mit Auflicht gearbeitet wird (Bild 6.2-1).

Nach der Digitalisierung eines Farbbildes ist noch die Frage zu klären, welche Objektstrahlung hinter den einzelnen Farbauszügen steckt. Hat man einen Positivfarbfilm (Bild 3.1-17) digitalisiert, entsprechen die Farbauszüge unmittelbar der jeweiligen Farbe der Objektstrahlung. Hat man dagegen einen Farbinfrarotfilm (Bild 3.1-19) abgetastet, haben wir folgende Entsprechungen:

Auszug mit	Objektstrahlung
Rotfilter	nahes Infrarot
Grünfilter	rot
Blaufilter	grün

Die Zuordnung der Farbauszüge zur Objektstrahlung ist mit unerwünschten Nebeneffekten begleitet, die vor allem von der starken Überlappung der Kennlinien für die spektrale Empfindlichkeit der drei Schichten der Filme (Bild 3.1-20) herrühren. Weitere Verzerrungen und Vermischungen der Information entstehen durch die drei Kennlinien der spektralen Transmissionsgrade  $\tau(\lambda)$  der im Abtaster verwendeten Filter (3.1.1.4.1). (Außerdem sind einige im Abschnitt 5.3.2 angeschnittenen Probleme zu beachten.

### 6.3 Wiedergabe digitaler Bilder

Das als Zahlenmatrix abgespeicherte digitale Bild ist im allgemeinen für den Endbenutzer nicht brauchbar. Auch möchte man vor der Verarbeitung einen optischen Eindruck über den Inhalt und die Qualität des Bildes erhalten, während der Verarbeitung die einzelnen Verarbeitungsschritte optisch kontrollieren und nach Abschluß der Verarbeitung das Ergebnis optisch dokumentieren.

Die wichtigsten Arten der optischen Darstellung eines digitalen Bildes sind:

- Darstellung auf einem Bildschirm,
- Belichtung auf Film und
- drucktechnische Wiedergabe.

Jedes dieser drei Verfahren ist, von seiner Bedeutung für die Praxis her gesehen, gleichwertig. Der Zweck, für welchen die bildliche Darstellung benötigt wird, entscheidet die Wahl des Verfahrens.

#### 6.3.1 Ausgabe auf einem Drucker

Bevor jedoch auf diese erwähnten hochwertigen Bildwiedergaben eingegangen wird, sollen kurz einige Ausgabemöglichkeiten angerissen werden, die kein spezielles Bildausgabegerät benötigen. In diese Kategorie sind alle Ausgabarten einzuordnen, die den an eine Rechenanlage angeschlossenen Zeilendrucker verwenden:

- Ausgabe der Zahlenmatrix in Hexadezimal-, Oktal- oder Dezimaldarstellung,
- Ausgabe einer Halbtondarstellung unter Ausnutzung der unterschiedlichen Dichte der druckbaren Zeichen bzw. durch Übereinanderdrucken mehrerer Zeichen,
- Ausgabe auf einem graphikfähigen Drucker.

##### Ausgabe der Zahlenmatrix:

Um die einzelnen Grauwerte eines Bildes überprüfen zu können, ist es vorteilhaft, die Zahlenmatrix auszugeben. Für die Zahlendarstellung kann die Dezimaldarstellung verwendet werden, die den Vorteil hat, daß man auf einen Blick den Grauwert der Pixel (z.B. im Bereich 0 bis 255) ansehen kann. Diese Darstellungsart hat zwei Nachteile. Erstens benötigt man, um gute Lesbarkeit zu erreichen, viel Platz (mindestens 3 Druckpositionen pro Pixel) und zweitens ist in solchen Fällen, in denen eher die Bit-Anordnung und weniger der Grauwert interessiert, erst mühsames Dekodieren notwendig.

Diesem zweiten Nachteil begegnet man durch Ausgabe im Oktalcode, bei welchem immer 2 bzw. 3 Bits zu einer Oktalziffer (0 bis 7) zusammengefaßt werden. Auch bei dieser Art benötigt man für die Darstellung der Grauwerte 0 bis 255 mindestens 3 Druckpositionen ( $\hat{=}$  oktal 000 bis 377). Die Dekodierung auf Bit-Muster ist jedoch besonders einfach (siehe Tab. 6.1-20).

Die Hexadezimaldarstellung ist die gebräuchlichste Ausgabeart. Sie erlaubt eine platzsparende Ausgabe (2 Druckpositionen pro Grauwert) und leichte Dekodierbarkeit auf Bit-Muster. Jeweils vier Bits werden zu einer Hexadezimalzahl (0,...,9,A,...F) zusammengefaßt. Der Grauwertebereich 0 bis 255 wird durch 00 bis FF dargestellt (siehe Tab. 6.1-11).

Auf Grund des hohen Platzbedarfes eignen sich diese Darstellungsmethoden nur für sehr kleine Bildausschnitte und nur für eine Detailanalyse sowie Fehlersuche.

#### Ausgabe auf einem alphanumerischen Drucker in Halbtonapproximation:

Die oben besprochenen Zahlenausgaben sind zwar sehr gut geeignet für die Beurteilung der Grauwerte bzw. der rechnerinternen Darstellungsart, sie sind aber nicht geeignet, einen optischen Eindruck des Bildes zu vermitteln. Mit dem einfachen Zeilendrucker kann man eine "Halbtondarstellung" erreichen, indem man jedem Grauwert ein druckbares Zeichen mit unterschiedlichem Helligkeitseindruck zuordnet. Dieses Verfahren ist auch für die Bilddarstellung auf einem alphanumerischen Bildschirm geeignet. Es ist selbstverständlich, daß man damit nicht den gesamten Grauwertebereich von 0 bis 255 voll darstellen kann. Man kann aber sicherlich bis zu acht unterschiedbare Helligkeitsstufen finden (Bild 6.3-1). Das beschriebene Verfahren kann auch für die Ausgabe auf einem alphanumerischen Bildschirm verwendet werden.

		G R A U W E R T E							
		0	1	2	3	4	5	6	7
GRAUKEIL	I	..	..	..	..	..	..	..	..
	I	..	..	..	..	..	..	..	..
	I	..	..	..	..	..	..	..	..
	I	..	..	..	..	..	..	..	..
	I	..	..	..	..	..	..	..	..
	I	..	..	..	..	..	..	..	..
	I	..	..	..	..	..	..	..	..
	I	..	..	..	..	..	..	..	..

Bild 6.3-1: Graukeilausgabe ohne Überdrucken mit einem Zeilendrucker

Eine etwas erweiterte Grauskala kann gefunden werden, wenn das verwendete Druckermodell das Überdrucken von Zeichen zuläßt (Bild 6.3-2). Doch stößt man auch hier bei etwa 16 unterscheidbaren Graustufen an die Grenze. Die für die Erzeugung verwendeten Zeichen hängen in hohem Maß auch vom Drucker- bzw. Bildschirmmodell ab.

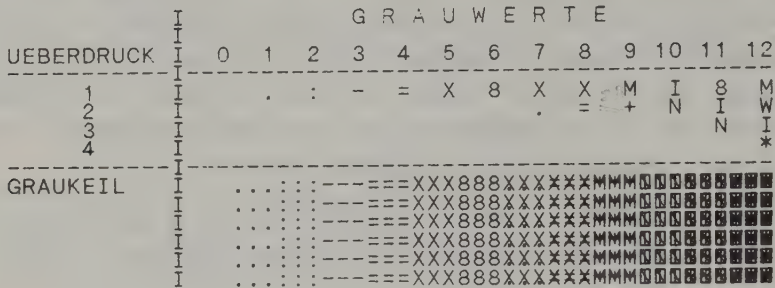


Abb.6.3-2: Graukeilausgabe mit einem Zeilendrucker mit Überdrucken

Ausgabe auf einem graphikfähigen Drucker:

Eine noch bessere Grauwertdarstellung erreicht man bei der Ausgabe auf Matrixdruckern, deren Zeichenmatrix programmierbar ist. In diese Kategorie fallen nicht nur die Nadeldrucker mit Farbband, sondern auch die Tintenstrahldrucker und elektrostatische Drucker (Laserdrucker). Diese Drucker gewinnen als Schnellausgabemedium immer mehr an Bedeutung und werden oft auch gemeinsam mit professionellen Bildverarbeitungsanlagen angeboten.

Ein Vorteil dieser Geräte liegt auch in der Möglichkeit der Farbdarstellung, deren Qualität für eine sehr gute thematische Darstellung ausreichend ist. Die Nadeldrucker arbeiten mit einem Vielfarbenband, die Tintenstrahldrucker mit verschiedenfarbigen Tintenpatronen (meist 4 Farben), die elektrostatischen Drucker mit verschiedenen Tonerfarben. Da der Druck auf weißem Papier mit der subtraktiven Farbmischung funktioniert, werden die Farben Cyan, Magenta und Gelb verwendet. Für eine optimale Schwarzdarstellung wird noch die Farbe Schwarz dazugenommen. Die erreichbare Farbqualität hängt entscheidend von der Farbbandqualität ab. Unterschiedliche Abnutzung der Farben führt zu Farbverfälschungen. Das Gelbband ist außerdem sehr empfindlich auf Verschmutzung, sodaß wirklich gute Ergebnisse nur mit neuen Farbbändern erzielt werden können.



### 6.3.2 Darstellung auf einem Farbbildschirm

Der Bildschirm findet vor allem in Verbindung mit interaktiven Bildverarbeitungssystemen Verwendung. Die maximale Bildgröße, die auf einem Bildschirm dargestellt werden kann, ist von der Soft- und Hardware des jeweiligen Bildverarbeitungssystem abhängig. Kleinere Systeme stellen Bilder bis zu 256x256 Pixel und 512x512 Pixel dar, größere verwenden 1024x1024 und mehr. Durch die weite Verbreitung der "personal computer" (PCs) mit hochauflösenden Graphikkarten und Farbbildschirmen gewinnen auch diese Geräte an Bedeutung für die Darstellung von digitalen Bildern. Da eine im Sinne der Bildverarbeitung vollwertige Farbdarstellung auf den konventionellen PCs jedoch augenblicklich nicht möglich ist, soll auf sie hier nicht näher eingegangen werden.

Die optische Qualität der Bildschirmdarstellung ist nicht nur von der Farbtreue der Bildröhre abhängig, sondern die Stärke des Flimmerns bestimmt die Brauchbarkeit der Darstellung. Als Kennzahl für das Flimmern kann die sogenannte Vertikalzeilenfrequenz gelten. Sie gibt an, wie oft pro Sekunde das gesamte Bild aufgebaut wird. Übliche Frequenzen liegen zwischen 25 und 60 Hz, gute Monitore erreichen bis zu 80 Hz. Diese Frequenz sollte nicht kleiner als 50 Hz sein. Ein technisches Detail, welches neben der Vertikalzeilenfrequenz ebenfalls noch beachtet werden sollte, ist der sogenannte "interlaced"-Modus. Ein Monitor, der im "interlaced" ( $\hat{=}$  verflochtenen) Modus arbeitet, baut das Bildschirmbild nicht Zeile für Zeile hintereinander auf, sondern bringt hintereinander zwei Halbbilder zur Darstellung. Zuerst werden alle ungeraden Zeilen aufgebaut und anschließend alle geraden Zeilen. Die Darstellung eines vollen Bildschirm Inhaltes braucht daher doppelt solange wie im "noninterlaced" Modus. Die wirksame Vertikalbildfrequenz ist daher zu halbieren. Heute üblich sind im allgemeinen Monitore im "noninterlaced" Modus.

Das darzustellende digitale Bild ist in einem Bildspeicher abgelegt. Dieser Speicher muß mit der gewünschten Vertikalfrequenz gelesen werden können. Ist der Speicherzugriff zu langsam, kann ebenfalls kein flimmerfreies Bild hergestellt werden. Das ist auch der Grund dafür, daß kleinere Bildverarbeitungssysteme mit geringem Hardwareaufwand nur kleine Bildmatrizen für die Bilddarstellung erlauben. Manchmal werden größere Matrizen nur für reine Schwarz-Weiß-Darstellung (= 1/3 der Datenmenge der "farbigen" Matrizen) zugelassen.

Die Farbdarstellung auf dem Bildschirm erfolgt nach dem additiven Farbmischungsgesetz. Für die Grundfarben Rot, Grün und Blau steht jeweils eine Farbkanone in der Bildröhre zur Verfügung. Über eine Loch- oder Schlitzmaske (je nach Bauart) werden die Elektronenstrahlen auf die Bildschirm-schicht projiziert. Der gesamte Bildschirm besteht aus sehr vielen nebeneinander liegenden phosphoreszierenden RGB-Tripeln, die jeweils einen farbigen Bildschirmpunkt darstellen (Bild 6.3-3). Leuchten alle drei Punkte eines Tripels mit voller Intensität, dann empfindet das Auge den Bildschirmpunkt als weiß. Die Farbe schwarz ist gegeben, wenn alle drei Punkte ausgeschaltet sind, sie ist also durch den unbeleuchteten Bildschirmhintergrund repräsentiert. Diese Tatsache zeigt, daß die Raumbelichtung und die Reflexionseigenschaft der Schirmoberfläche bereits wesentlichen Einfluß auf die Farbdarstellung auf dem Monitor hat. Je heller die Raumbelichtung und je stärker die Reflexion an der Schirmoberfläche, desto höher muß die Intensität des Elektronenstrahles gestellt werden, um einen guten Bildkontrast zu erhalten.

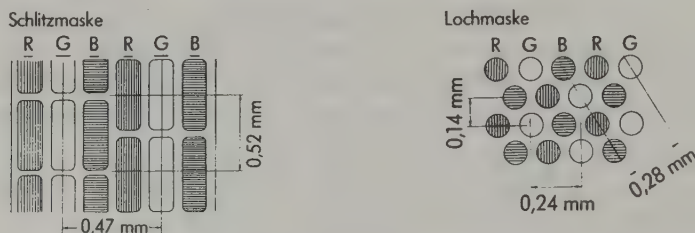


Abb.6.3-3: Beispiel eines Aufbaues eines Farbbildschirmes (entnommen aus Kundeninformation der Fa. EIIZO)

Farbdarstellungen auf dem Bildschirm können schwer auf ein objektives Maß geeicht werden. Zu sehr haben äußere Bedingungen, die Stellung des Kontrast- und Helligkeitsreglers, Bauart und Alter der Bildröhre Einfluß auf die Farbwiedergabe. Eine solche Eichung ist nicht wichtig, solange man den Bildschirm als alleiniges Mittel zur Bilddarstellung und zur Kontrolle interaktiver Bildverarbeitungsprozesse verwendet. Eine Eichung gewinnt aber an Bedeutung, wenn man auf Grund der Bildschirmdarstellung auf die Darstellung bei einer Bildausgabe durch Filmbelichtung bzw. durch Druck schließen möchte. Die Ableitung einer Kontrastübertragungsfunktion (6.6.1) als Korrekturbefehl muß nicht nur für verschiedene Bildschirm-einstellungen abgeleitet werden, sie muß auch die verschiedenen Filmtypen, das Filmbelichtungsgerät, die Druckfarben und den Typ des Druckrasters berücksichtigen.

Durch Versuche mit Farb- und Graukeilwiedergaben und densitometrische Messungen können Kontrastübertragungsfunktionen (6.6.1) für die einzelnen Farben abgeleitet werden, sodaß bei Belichtung auf Film bzw. bei Wiedergabe durch Druck ein dem Bildschirmbild farblich möglichst gut entsprechendes Bild entsteht. Wie aus der Farbenlehre bekannt ist, kann eine optimale Farbanpassung nicht durch Kontrastfunktionen alleine erreicht werden. Eine Farbraumtransformation wäre das geeignete Verfahren.

### 6.3.3 Ausgabe auf Film

Unter Darstellung auf Film soll hier nicht das Abphotographieren vom Bildschirm verstanden werden, das häufig zum Dokumentieren von Bildverarbeitungsergebnissen verwendet wird. Diese Methode führt zu Ergebnissen von schlechter geometrischer Qualität. Die Verzerrungen entstehen durch Justierungsfehler der Elektronenröhre, durch die leichte Wölbung des Bildschirms und durch die Verzeichnung des Objektives der Kamera<sup>1</sup>.

Etwas höherwertige Aufnahmen sind durch eigene Hardcopy-Geräte zu erzielen. Solche Geräte besitzen meist einen extrem gut auflösenden S/W-Monitor mit einer sehr geringen Bildschirmwölbung. Die Filmbelichtung geschieht ebenfalls durch Abphotographieren, wobei auf dem Monitor hintereinander der Rot-, Grün- und Blauauszug dargestellt wird, und die Belichtung durch Vorschalten eines Rot-, Grün- und Blaufilters erfolgt.

Für geometrisch exakte Wiedergaben werden eigene Bildausgabegeräte verwendet, welche ein paßgenaues Aneinanderfügen der Bildelemente ermöglichen. Sie können als Flachbett- oder Trommelversion ausgeführt sein. Als Beispiel für die zweite Gruppe sei hier stellvertretend das Gerät C4500 Colormation der Fa. Optronics/Intergraph angeführt, welches sowohl für Zwecke der Bild-

---

<sup>1</sup> Beim Abphotographieren vom Bildschirm muß beachtet werden, daß es sich bei einer Darstellung auf Bildschirm nur scheinbar um ein stationäres Bild handelt. Wie bereits früher erwähnt wurde, ist die Wiedergabe ein dynamischer Prozeß, der je nach Bildschirmfrequenz langsamer oder schneller abläuft. Bei der Wahl der Belichtungszeit ist dies zu berücksichtigen. Wählt man eine zu kurze Belichtungszeit, so erhält man ein unvollständiges Bild. Um sicher zu sein, sollte die Belichtungszeit bedeutend länger als eine 1/30 Sekunde sein. Noch einige praktische Hinweise: Belichtungsautomatik abschalten; zu einem 100 ASA-Tageslichtfilm paßt bei einer Blende zwischen 5.6 und 8 eine Belichtungszeit von 1 Sekunde; da das (Dia-)Filmmaterial sehr hart ist, sollte man den Kontrast am Bildschirm vor dem Photographieren reduzieren (z.B. nur Farbwerte zwischen 50 und 200).

digitalisierung als auch der Bildausgabe geeignet ist. Der Digitalisierteil wurde bereits im Kapitel 6.2 besprochen. Der Belichtungsteil funktioniert nach dem gleichen Prinzip, nur umgekehrt.

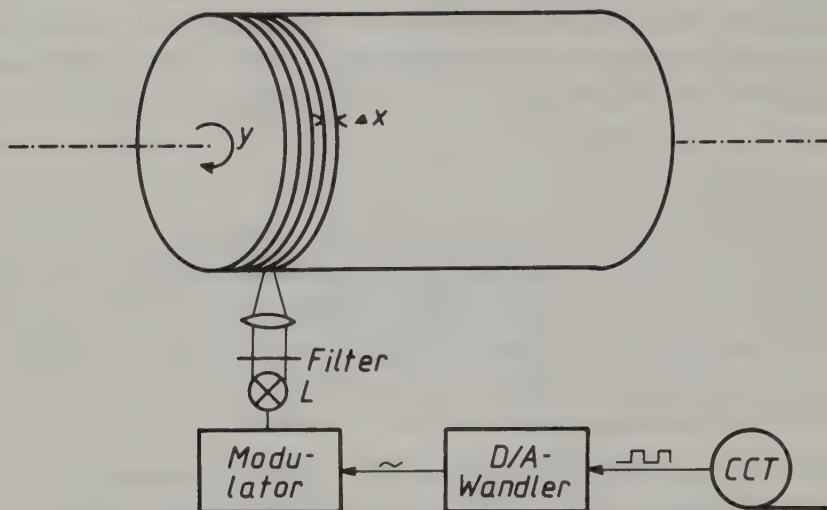


Abb.6.3-4: Prinzip eines zeilenweisen Belichtungsgerätes in Trommelbauweise

Eingegeben werden zeilenweise die digitalen Daten für einen Farbauszug. Nach einer Digital-Analog-Wandlung der eingelesenen Grauwerte wird eine weiße Lichtquelle in ihrer Helligkeit moduliert. Zwischen Lichtquelle und Film wird ein dem gewünschten Farbauszug entsprechendes Filter (Rot, Grün oder Blau) vorgeschaltet. Die Belichtung des Filmes erfolgt zeilenweise auf der rotierenden Trommel. Ist die Belichtung für einen Farbauszug beendet, erfolgt die Bereitstellung der Daten für den nächsten Auszug und ein Filterwechsel. Der neue Datensatz wird darüberbelichtet.

Dieses Hintereinanderbelichten benötigt die dreifache Zeit im Vergleich zu einer Schwarzweiß-Belichtung. Es gibt daher Geräte, welche die gleichzeitige Belichtung aller drei Farbauszüge erlauben. Vor drei unabhängig modulierten Lichtquellen sind die Filter Rot, Grün und Blau montiert. Die drei "eingefärbten" Lichtstrahlen werden über ein optisches System zusammengespiegelt und der Summationsstrahl wird auf die Filmschicht abgebildet.

Für einen schnellen Belichtungsvorgang muß die Lichtquelle erstens extrem schnell modulierbar sein und zweitens eine hohe Lichtintensität haben. In neuerer Zeit geht man dazu über, Laser für diesen Zweck einzusetzen, wobei



sich das Vorschalten von Farbfiltern durch Verwendung geeigneter Farblaser erübrigt.

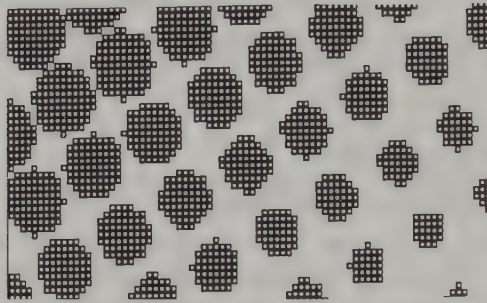
Der auf dem belichteten Film wiedergegebene Farbton ist sehr vom verwendeten Filmtyp, aber auch von der Filmentwicklung abhängig. Erfolgt die Entwicklung in einem Farblabor mit standardisierten Einstellwerten, dann kann man davon ausgehen, daß der Einfluß der Filmentwicklung auf die Farbwiedergabe über längere Zeit unverändert bleibt. Um Belichtungen auf unterschiedlichem Filmmaterial miteinander vergleichen zu können, muß eine Eichung über Farb- und Graukeile erfolgen. Die Korrektur aus der Eichung ist genau genommen eine Transformation im Farbraum; sie wird in der Praxis aber mit geeigneten Kontrastübertragungsfunktionen (6.6.1) bewältigt. Es ist auf jeden Fall ratsam, bei allen Abspielungen einen Graukeil und einen Farbkeil (Balken mit den additiven und subtraktiven Grundfarben) mitzubelichten. Dies erlaubt jederzeit die Beurteilung der Farbqualität einer Abspielung und gibt einen Hinweis auf die Vergleichbarkeit von Farben unterschiedlicher Abspielungen.

#### 6.3.4 Drucktechnische Wiedergabe

Die Ausgabe eines digitalen Bildes mit Hilfe drucktechnischer Verfahren wird nur dann sinnvoll sein, wenn eine große Auflage benötigt wird. Um ein Halbtonbild drucken zu können, muß eine Rasterung des Bildes erfolgen. Der Halbtoneindruck im gedruckten Bild entsteht dadurch, daß mehr oder weniger große einfärbige Rasterpunkte unterschiedliche Anteile weißen Papierhintergrundes sichtbar werden lassen. Der Abstand der einzelnen Rasterpunkte voneinander (und damit die Größe des maximalen Rasterpunktes) bestimmt die Druckqualität. Die Angabe erfolgt in Linien pro cm. Ein qualitativ minderwertiger Zeitungsdruck verwendet eine Rasterung von etwa 40 Linien/cm, höchstwertiger Kunstdruck verwendet 120 Linien/cm. Für Offsetdruck liegen normalerweise die Rasterweiten bei 60 bis 80 Linien/cm. Auch Orthophoto- und Satellitenbildkarten werden i.a. mit diesen Auflösungen gedruckt.

In der konventionellen Drucktechnik entsteht eine Rasterdarstellung, indem das zu druckende Halbtonbild über ein Kontaktraster (= fertig erhältlicher Film mit moduliertem Punktraster) auf einen extrem harten Film belichtet wird. In jüngster Zeit wird immer mehr die sogenannte digitale (oder auch elektronische) Rasterung eingesetzt. Die einzelnen Druckrasterpunkte werden dabei aus mehr oder weniger vielen, wesentlich kleineren, aber konstant großen Einzelpunkten zusammengesetzt (Bild 6.3-5). Der gesamte Druckraster

ist daher eine auf Film ausgegebene Darstellung eines digitalen binären (d.h. aus den Grauwerten Weiß und Schwarz bestehenden) Bildes mit extrem kleinen Bildelementen. Die Form des einzelnen Rasterpunktes (z.B. kreisrund, elliptisch, quadratisch) kann gewählt werden. Geräte, die elektronische Druckraster erzeugen und ausgeben können, werden als "Reproplotter" bezeichnet. Sie funktionieren i.a. nach dem früher beschriebenen Trommelplotterprinzip und sind in Großdruckereien eingesetzt. Durch neue elektronische Bauteile und bessere Mikroprozessoren wird es möglich, solche Plotter leistungsfähiger und für universellere Anwendungen zu bauen. Das so erreichbare bessere PreisLeistungsverhältnis kann eine weitere Verbreitung elektronischer Druckrastererzeugung, auch in Verbindung mit Bildverarbeitungsanlagen, einleiten.



*Bild 6.3-5: Druckrasterpunkte, erzeugt durch digitale Rasterung*

Da die elektronische Druckrastererstellung selbst einen digitalen Bildverarbeitungsprozeß darstellt, ist es nicht mehr notwendig, ein zu druckendes digitales Bild zuerst auf Film zu belichten. Man kann sofort die Grauwerte des digitalen Halbtonbildes mit Methoden der Bildverarbeitung in entsprechende Pixelanordnungen des digitalen Druckrasterbildes umwandeln.

Wenn ein Farbdruck erzeugt werden soll, müssen die Farbauszüge nach dem Gesetz der subtraktiven Farbmischung übereinandergedruckt werden. Theoretisch sind drei Farben ausreichend, um alle anderen Farben darstellen zu können. In der Praxis zeigt sich, daß ein aus subtraktiver Mischung erzeugtes Schwarz nicht tiefschwarz erscheint. Die Konturen in Bildern, die mit einem Drei-Farben-Druck erzeugt wurden, wirken flau. Um diesen Nachteil zu vermeiden, wird mit der Druckfarbe Schwarz ein vierter Überdruck (Kraftton)

durchgeführt (→ Vier-Farben-Druck)<sup>1</sup>. Dieser Kraftton kann bei digitalen Bilddaten aus den anderen drei Farbauszügen abgeleitet werden. Auf Grund der geltenden subtraktiven Farbmischung müssen die für die additive Mischung vorgesehenen Originalbilddaten durch Komplementbildung entsprechend verändert werden. Das bedeutet, daß die Auszüge der additiven Farben zu den komplementärfarbigem Druckauszügen werden (Rotauszug → Cyanauszug, Grünauszug → Magentauszug, Blauauszug → Yellowauszug) und daß die ursprünglichen Grauwerte ebenfalls komplementiert werden ( $\text{Grauwert}_{\text{sub}} = 255 - \text{Grauwert}_{\text{add}}$ , siehe 6.1.1.1). Diese Gesetzmäßigkeiten gelten in der Praxis nur näherungsweise. Der Grund liegt darin, daß die beim Druck verwendeten Farben sich nicht einfach durch Komplementbildung aus gegebenen additiven Farben ableiten lassen. Optimale Ergebnisse können mit Hilfe einer Farbraumtransformation erhalten werden.

Eine schnelle Kontrolle, ob die gerasterten Daten ein qualitativ gutes Druckbild ergeben werden, ist mit Hilfe von Schnellandruckverfahren möglich. Es handelt sich hierbei um Methoden, die mit lichtempfindlichen Klebeschichten und mit Pulverfarben, welche den in der Druckmaschine verwendeten Farben exakt entsprechen, arbeiten. Ein Schnellandruck liefert allerdings nur ein Exemplar.

---

<sup>1</sup> In der Praxis ist ein rasterpunktgenaues Übereinanderdrucken nicht möglich. Es entstehen störende Moiréerscheinungen. Diese können durch Verwinklung, d.h. durch unterschiedliche Rasterrichtungen (für konventionelle Raster 0° für Yellow, 15° für Magenta, 45° für Schwarz und 75° für Cyan) in den einzelnen Farbauszügen verhindert werden. Bei der Erzeugung eines digitalen Rasters führt die Bedingung der Verwinklung zu größerem Rechenaufwand. Außerdem müssen aus ganzzahligen Verhältnissen sogenannte rationale Winkelungen gefunden werden.

## 6.4 Geometrische Rektifizierung

Die Elemente eines digitalen Bildes sollten in einem Koordinatensystem angeordnet sein, das dem Landeskoordinatensystem entspricht. Wenn alle digitalen Bilder diese Eigenschaft haben, ist einerseits der EDV-technische Vergleich von Bildern unterschiedlichen Datums (multitemporale Daten) sowie unterschiedlicher Sensoren (multisensorale Daten) leicht möglich und andererseits der Bezug zu anderen Informationen eines topographischen Informationssystems vorhanden. Im Rahmen der geometrischen Rektifizierung löst man die Aufgabe, die von den Aufnahmesystemen gelieferten Bildelemente so umzuordnen, daß die Bildelemente der rektifizierten Bilder im Landeskoordinatensystem angeordnet sind. Die Bildelemente werden sozusagen auf der Erde positioniert (Geokodierung).

Die Methoden der geometrischen Rektifizierung hängen davon ab, ob die Aufnahmen mit photographischen Systemen oder mit Abtastsystemen gemacht wurden. Eine weitere Unterscheidung bringt die Art der Plattform, also ob es sich um Flugzeug- oder Satellitenaufnahmen handelt. Außerdem sind noch verschiedene mathematische Ansätze zu beachten. Die Spezialitäten der Rektifizierung von RADAR-Aufnahmen werden in einem eigenen Kapitel (6.4.4) angesprochen.

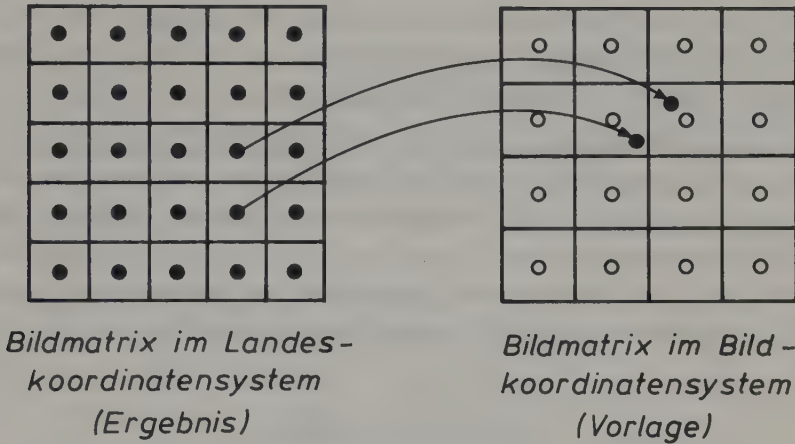
### 6.4.1 Rektifizierung der aus Photographien entstandenen digitalen Bilder

Digitalisiert man ein Orthophoto (5.1.5) mit dem Photoabtaster (6.2), so fallen die Bildelemente unmittelbar im Landeskoordinatensystem an; eine geometrische Rektifizierung ist nicht erforderlich. Wenn man die Auswertung der Aufnahmen mit der digitalen Bildverarbeitung vornimmt, sollte man allerdings die - nicht genau kontrollierbaren - photographischen Prozesse im Rahmen der Orthophotoherstellung möglichst ausschalten und unmittelbar das Luftbildoriginal im Photoabtaster digitalisieren. Die Bildelemente beziehen sich dann auf das Bildkoordinatensystem; sie sind ins Landeskoordinatensystem zu transformieren.

Zu diesem Zweck definiert man im Landeskoordinatensystem eine Bildmatrix und holt aus der Matrix des Luft- oder Weltraumbildes die dazugehörenden Grau- oder Farbwerte (Bild 6.4-1). Um die entsprechenden Positionen in den beiden Bildmatrizen zu finden, sind die Mittelpunkte der Bildelemente vom Landeskoordinatensystem in das Bildkoordinatensystem zu transformieren. Die erforderlichen Transformationsformeln haben wir bereits kennengelernt, und



zwar für die Rektifizierung von Luftbildern im Abschnitt 5.1.5.1 und für die Rektifizierung von Weltraumbildern im Abschnitt 5.1.5.2. Dabei ist zu beachten, daß diese Transformationen ein digitales Geländemodell (5.1.4.4)<sup>1</sup> voraussetzen.



*Bild 6.4-1: Zusammenhang der Bildmatrizen im Landes- und im Bildkoordinatensystem*

Da die Transformation der Bildelement-Mittelpunkte vom Landeskoordinatensystem in das Bildkoordinatensystem in der Regel zwischen die Bildelement-Mittelpunkte des Vorlagebildes fällt (Bild 6.4-1), ist noch die Frage einer zweckmäßigen Zuordnung der Grauwerte für die transformierten Punkte zu klären. In der Praxis sind folgende drei verschiedene Verfahren gebräuchlich:

a) Nächster Nachbar (nearest neighbour). In diesem Fall wird der Grauwert jenes Bildelementes genommen, dessen Mittelpunkt dem transformierten Punkt am nächsten liegt. In die Position 3,4 (3. Zeile und 4. Spalte) des rektifizierten Bildes kommt im Beispiel 6.4-1 der Grauwert  $g_{2,3}$  der Matrix des Vorlagebildes, in die Position 4,4 der Grauwert  $g_{2,2}$  usw.

<sup>1</sup> Um Rechenzeiten bei diesen aufwendigen Transformationen einzusparen, beschränkt man sich auf die Transformation z.B. eines jeden zehnten Bildelementes in der einen und in der anderen Koordinatenrichtung. Innerhalb dieser Masche von 10x10 Bildelementen berechnet man sich die Positionen der einzelnen Bildelemente im Vorlagebild mit Hilfe der weniger rechenaufwendigen bilinearen Transformation (z.B. Jansa, 1983).

Diese Methode erfordert äußerst geringe Rechenzeiten. Als weiterer Vorteil ist zu erwähnen, daß die ursprünglichen Grau- bzw. Farbwerte unverändert bleiben. Als Nachteil ist anzuführen, daß die Bildelemente im ungünstigsten Fall bis zu einer halben Rasterweite verschoben werden. Durch diese Verschiebungen kommt es auch zu Versetzungen im Lineament des rektifizierten Bildes. Damit kein Bildelement vom Vorlagebild verlorengeht, sind die Bildelemente des rektifizierten Bildes deutlich kleiner (z.B. um 1/3 reduziert) zu wählen als die Bildelemente des Vorlagenbildes.

b) Bilineare Interpolation. In diesem Fall wird der Grauwert mittels der bilinearen Interpolation aus den vier Nachbarn bestimmt (Bild 6.4-2). Die vier Grauwerte  $g_1, g_2, g_3, g_4$  des Vorlagebildes definieren - falls in Richtung der Koordinatenachsen linear interpoliert wird - in einer Masche mit den Quadratseiten  $\Delta$  ein parabolisches Hyperboloid. Der Grauwert  $g_{x,y}$  in der Position  $x, y$  berechnet sich aus folgender Formel (Ableitung C 3.3.1):

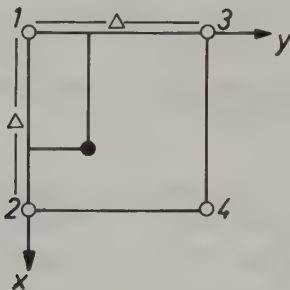


Bild 6.4-2: Bilineare Grauwertinterpolation

$$g_{x,y} = \left(1 - \frac{x}{\Delta} - \frac{y}{\Delta} + \frac{xy}{\Delta^2}\right) g_1 + \left(\frac{x}{\Delta} - \frac{xy}{\Delta^2}\right) g_2 + \left(\frac{y}{\Delta} - \frac{xy}{\Delta^2}\right) g_3 + \frac{xy}{\Delta^2} g_4 = \sum_{i=1}^4 b_i g_i \quad (6.4-1)$$

Zahlenbeispiel: Dabei wird  $\Delta = 1$  gewählt, d.h.  $x$  und  $y$  variieren zwischen 0 und 1. Der zu interpolierende Punkt hat - in Bezug zum linken oberen Eckpunkt - die Koordinaten  $x = 0.75$  und  $y = 0.25$ . Damit folgt aus (6.4-1):

●      ●  
160    140  
■  
●      ●  
180    150

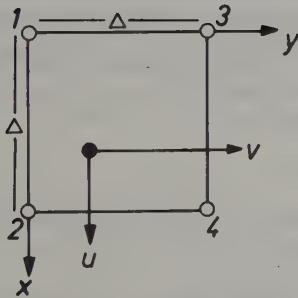
$$G_{0.75,0.25} = 0.1875 \cdot 160 + 0.5625 \cdot 180 + 0.0625 \cdot 140 + 0.1875 \cdot 150 = 168$$

Die Koeffizienten  $b_i$  in der Gleichung (6.4-1) bekommt man noch einfacher aus der sogenannten Basis- bzw. Gewichtsfunktion. Eine Gewichtsfunktion ist eine (zweidimensionale) Funktion, die im Ursprung eines lokalen  $uv$ -Systems den Wert 1 und an der Stelle  $|u| = \Delta$  und/oder  $|v| = \Delta$  den Wert 0 annimmt. Für die bilineare Interpolation hat die Gewichtsfunktion folgenden Verlauf (Bild 6.4-3):

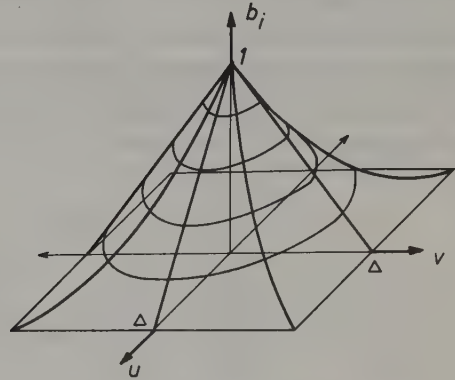
$$b_i = b_u \cdot b_v \quad (6.4-2)$$

$$b_u = 1 - \frac{|u|}{\Delta} \quad |u| \leq \Delta \quad (6.4-3)$$

$$b_v = 1 - \frac{|v|}{\Delta} \quad |v| \leq \Delta$$



Interpolationsstelle innerhalb der Masche



Gewichtsfunktion

Bild 6.4-3: Bilineare Grauwertinterpolation

Die Bezeichnung "Gewichtsfunktion" hängt damit zusammen, daß sie das Gewicht angibt, mit dem der jeweilige (bekannte) Grauwert den zu interpolierenden Grauwert beeinflusst.

Fortsetzung des Zahlenbeispiels: Für die Gleichung (6.4-1) werden nun die Koeffizienten  $b_i$  aus (6.4-2) und (6.4-3) berechnet:

$$g_{0.75,0.25} = (1-0.75)(1-0.25)160 + (1-0.25)(1-0.25)180 + \\ + (1-0.75)(1-0.75)140 + (1-0.25)(1-0.75)150 = 168$$

Die bilineare Interpolation ist aufwendiger als der "nächste Nachbar", hat aber den Vorteil, daß im Lineament keine Versetzungen mehr auftreten. Andererseits ist darauf hinzuweisen, daß die ursprünglichen Grau- bzw. Farbwerte nicht erhalten bleiben; die Bildkontraste werden - abhängig von der Ortsfrequenz der Bildsignale (6.7.4) - gemindert.

Aufgabe 6.4-1: Man wiederhole das Zahlenbeispiel unter der Annahme, daß die Interpolationsstelle von den vier Eckpunkten gleich weit entfernt ist.

Aufgabe 6.4-2: Man wiederhole das Zahlenbeispiel unter den Annahme, daß die Interpolationsstelle mit einem der vier Stützpunkte zusammenfällt.

Aufgabe 6.4-3: Man überlege sich für die Methode "nächster Nachbar" die Gewichtsfunktion.

c) Interpolation höherer Ordnung. Die mit der bilinearen Interpolation verbundene Dämpfung des Kontrastes kann weitgehend umgangen werden, wenn man nicht nur die vier benachbarten Bildelemente sondern z.B. die 16 benachbarten Bildelemente für eine Interpolation höherer Ordnung benutzt. Die Gewichtsfunktion ist dann im Bereich  $-2\Delta \leq u \leq 2\Delta$  und  $-2\Delta \leq v \leq 2\Delta$  zu definieren, wobei im Ursprung wieder der Wert 1 und entlang der Koordinatennetzlinien  $u = -2\Delta, -\Delta, \Delta, 2\Delta$  und  $v = -2\Delta, -\Delta, \Delta, 2\Delta$  der Wert 0 gegeben sein muß. Die Funktion

$$b_i = \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot u}{\Delta}\right)}{\frac{\pi \cdot u}{\Delta}} \quad |u| \geq |v|, \quad |u| \leq 2\Delta$$

(6.4-4)<sup>1</sup>

$$b_i = \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot v}{\Delta}\right)}{\frac{\pi \cdot v}{\Delta}} \quad |v| \geq |u|, \quad |v| \leq 2\Delta$$

erfüllt diese Eigenschaft. Sie ist für einen Quadranten im Bild 6.4-4 skizziert.

<sup>1</sup> Für die Approximation dieser Funktion findet man bei Jansa (1983) eine - weniger rechenaufwendige - Splinefunktion.



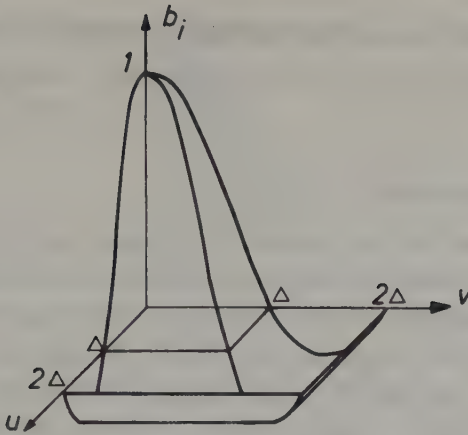


Bild 6.4-4: Gewichtsfunktion für eine Interpolation mit 16 benachbarten Punkten

Hinweis: Die Interpolation mit der Gewichtsfunktion (6.4-4) hat noch einen interessanten theoretischen Hintergrund, wobei wir uns auf den eindimensionalen Fall beschränken: Digitalisiert man ein Signal mit dem Digitalisierungsintervall  $\Delta$ , und besteht das Signal nur aus Wellenlängen größer als  $2\Delta$ , so kann aus den digitalisierten Werten das ursprüngliche (kontinuierliche) Signal wieder fehlerfrei mittels Interpolation rekonstruiert werden, wenn man als Gewichtsfunktion die Beziehung (6.4-4) verwendet, allerdings nicht beschränkt auf die 4 benachbarten Punkte sondern - streng genommen - auf unendlich viele benachbarte Punkte. Außerdem ist noch zu beachten, daß vor der Interpolation - in Anlehnung an die Fourierreihe (3.2.1.2) - der konstante Anteil in den Grauwerten herauszunehmen ist. Mit anderen Worten: Die Grauwerte sind zu zentrieren (z.B. Azizi, 1983, Brigham, 1985, He, 1989).

Aufgabe 6.4-4:

Gegeben ist die nebenstehende Grauwertmatrix. Für den transformierten Bildpunkt, der  $0.25 \cdot \Delta$  rechts und  $0.25 \cdot \Delta$  oberhalb des Bildelementes 180 liegt, ist der Grauwert mit der Interpolation, die mit den Gleichungen (6.4-4) und (6.4-1) definiert ist, zu berechnen. (Hinweis: Vor der Interpolation ist der konstante Anteil innerhalb des Interpolationsfensters herauszunehmen; dieser konstante Anteil ist zum Schluß zum Interpolationswert hinzuzufügen.)

●	●	●	●
165	145	136	130
●	●	●	●
170	160	140	138
●	●	●	●
190	180	150	155
●	●	●	●
220	201	152	150

### 6.4.2 Rektifizierung der mit Abtastern in Flugzeugen aufgenommenen Bilder

Der eigentlichen geometrischen Rektifizierung geht die sogenannte Panorama-korrektur voraus.

#### 6.4.2.1 Panoramakorrektur und Zeilenschiefe

Bei Rotationsabtastern (3.2.1.1) und bei zeilenweise abtastenden Mikrowellenradiometern (3.4.2) erfolgt die Digitalisierung des empfangenen Signales mit konstantem Zeitintervall; mit anderen Worten: der gesamte Öffnungswinkel  $2\alpha$  wird in gleiche Teile unterteilt (Bild 6.4-5). In einer im Abstand  $c$  angenommenen Bildebene vergrößern sich also die Bildelemente von der Bildmitte zum Bildrand um den Faktor  $1/\cos^2\alpha$  (siehe Gleichung (3.2-2)). Bei der Visualisierung des digitalen Bildes erhalten aber alle Bildelemente die gleiche Größe, sodaß eine zunehmende Stauchung von der Bildmitte zum Bildrand - in  $\bar{y}$ -Richtung - eintritt. Diese sogenannte Panoramaverzerrung ist systembedingt.

Man kann die Verzerrung dadurch korrigieren, das man in  $y$ -Richtung gleich-abständige Bildelemente annimmt und sich die entsprechende Position in der  $\bar{y}$ -Bildzeile aus der folgenden Gleichung berechnet (Bild 6.4-5):

$$\boxed{\bar{y} = c \cdot \hat{\alpha} = c \cdot \arctan \frac{y}{c}} \quad (6.4-5)$$

Der für die jeweilige  $y$ -Position gesuchte Grauwert wird in der berechneten  $\bar{y}$ -Position durch Interpolation aus den benachbarten Grauwerten ermittelt. Diesbezügliche Interpolationsverfahren haben wir im Abschnitt 6.4.1 bereits kennengelernt, wobei statt der dort angegebenen zweidimensionalen Interpolation hier eine eindimensionale Interpolation auszuführen ist.

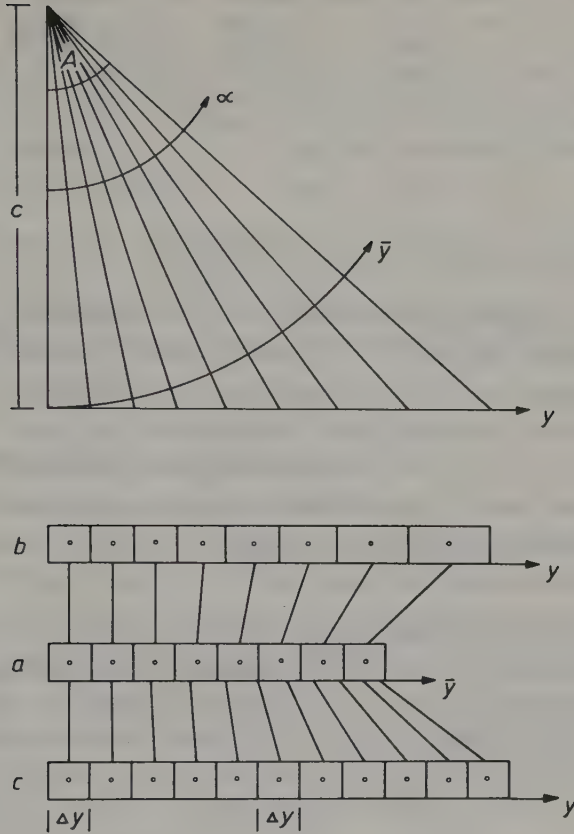


Bild 6.4-5: Panoramaverzerrung

a) Originaldaten einer Halbzeile

b) panoramakorrigierte Daten mit Bildelementen ungleicher Größe

c) panoramakorrigierte Daten mit Bildelementen gleicher Größe (interpoliert)

Zahlenbeispiel:

$\bar{y}$ -Position	g
.	.
.	.
292	203
293	210
294	207
295	205
.	.
.	.

Mit einem Rotationsabtaster (Öffnungswinkel  $\Delta\alpha = 2.5 \text{ mrad}$ ) wurden die nebenstehenden Grauwerte g an den angegebenen  $\bar{y}$ -Positionen registriert, wobei der Anfang des 1. Bildelementes  $\alpha = \bar{y} = 0$  entspricht (siehe Bild 6.4-5). Die Bildelemente in y-Richtung werden mit  $\Delta y = 100 \mu\text{m}$  dargestellt. Daraus ergibt sich eine "Kammerkonstante" c von

$$c[\text{mm}] = \frac{\Delta y[\text{mm}]}{\Delta\alpha} = \frac{0.1}{0.0025} = 40 \text{ mm} \quad (6.4-6)$$

Der Mittelpunkt z.B. des 360. Bildelementes in y-Richtung hat eine y-Koordinate von  $y = 0.1 \cdot 360 - 0.05 = 35.95$  mm. Daraus ergibt sich mittels Gleichung (6.4-5):  $\bar{y} = 40 \cdot \arctan(35.95/40) = 29.285$  mm bzw.  $\alpha = 29.285/40 = 0.732125$  rad bzw.  $\bar{y}$ -Position =  $0.732125/0.0025 = 292.85$ . Der Grauwert für das 360. Bildelement in y-Richtung, das dem 292.85sten Bildelement in  $\bar{y}$ -Richtung entspricht, kann - z.B. durch lineare Interpolation - aus der oben angegebenen Tabelle entnommen werden:

$$g_{360} = 203 + 7 \cdot 0.85 = 209$$

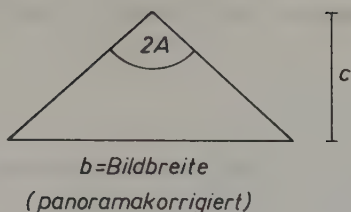
Aufgabe 6.4-4: Man wiederhole das Zahlenbeispiel für das 361. und 362. Bildelement in y-Richtung.

Eine weitere, systembedingte Verzerrung ist die sogenannte Zeilenschiefe. Sie kann an Hand des Bildes 3.2-1 erläutert werden: Infolge der kontinuierlichen Fortbewegung der Plattform verlaufen die einzelnen Zeilen nicht genau senkrecht zur Flugachse. Die Zeilenschiefe ist umso größer, desto schneller sich die Plattform fortbewegt und desto geringer die Abtastfrequenz ist (Jansa, 1983). Die Zeilenschiefe muß nicht weiter behandelt werden, da sie einer Verkantung des Abtasters entspricht, die im Abschnitt 6.4.2.3 diskutiert wird.

Nach durchgeführter Panoramakorrektur entspricht jede mit einem Rotationsabtaster aufgenommene Bildzeile einer exakten Zentralprojektion des abgetasteten Geländestreifens. Die Panoramakorrektur führt die mit einem Rotationsabtaster aufgenommenen Bilder - in geometrischer Hinsicht - in neue Bilder über, die mit einer digitalen Zeilenkamera (Bild 3.2-25) aufgenommen sein könnten.

Bei einer digitalen Zeilenkamera ist das Projektionszentrum der Bildzeile bekannt: Es liegt um die Kammerkonstante  $c$ , die etwa der Brennweite  $f$  des Aufnahmeobjektives entspricht, vor der Mitte der Bildzeile ( $\hat{=}$  Bildhauptpunkt in Anlehnung an Abschnitt 3.1.1.1). Die Kammerkonstante  $c$  und etwaige Abweichungen des Bildhauptpunktes vom zentral liegenden Bildelement gibt der Hersteller des Abtasters bekannt. Das Projektionszentrum einer Bildzeile, die mit einem Rotationsabtaster aufgenommen und panoramakorrigiert ist, liegt ebenfalls vor der Mitte der Bildzeile. Die dazugehörige Kammerkonstante ergibt sich aus der Bildelementgröße  $\Delta y$  und dem Öffnungswinkel  $\Delta \alpha$  des Abtasters (Gleichung 6.4-6). Für panoramakorrigierte Bilder kann man sie auch aus der Breite  $b$  des visualisierten Bildes und dem gesamten Öffnungswinkel des Abtasters,  $2A$ , berechnen:





$$c = \frac{b}{2 \tan A} \quad (6.4-7)$$

Wir kommen nun zu den geometrischen Rektifizierungsmethoden, wobei wir – nachdem die Panoramakorrektur vorher angebracht wird – keine Unterscheidung zwischen Bildern von Rotationsabtastern und von digitalen Zeilenkameras mehr treffen müssen.

#### 6.4.2.2 Nichtparametrische Rektifizierung

Die einfachste Methode der geometrischen Rektifizierung ist die sogenannte nichtparametrische Lösung. Sie baut nicht auf den Flugparametern auf, deren Variation in erster Linie die Verzerrungen in den mit Abtastern aufgenommenen digitalen Bildern erzeugen. Die nichtparametrische Lösung stellt den Zusammenhang zwischen dem rektifizierten Bild im Landeskoordinatensystem und dem Vorlagebild mit Hilfe eines zweidimensionalen Interpolationsansatzes her, dessen Koeffizienten aus Paßpunkten ermittelt werden. Paßpunkte sind Punkte, die im Vorlagebild identifiziert werden können und deren Koordinaten sowohl im Landeskoordinatensystem als auch im Koordinatensystem des Vorlagebildes bekannt sind.

Die Landeskoordinaten der Paßpunkte werden in der Regel aus topographischen Karten abgegriffen. Die Koordinaten der Paßpunkte im Vorlagebild werden auf verschiedene Weise ermittelt. Eine verbreitete Variante ist die Identifizierung des jeweiligen Paßpunktes am Bildschirm, sodaß über die Indizes des identifizierten Bildelementes die Koordinaten des Vorlagebildes gegeben sind bzw. berechnet werden können. Als zweite Variante ist die automatische Korrelation der im Landeskoordinatensystem definierten Paßpunkt-Mustermatrix mit dem Vorlagebild zu erwähnen (6.10).

Sind für  $n$  Paßpunkte die Koordinaten in beiden Systemen, also im XY-System und im xy-System, bekannt, so kann man folgende zweistufige Transformation vornehmen.

1. Stufe: Sie führt einen groben Zusammenhang zwischen den xy-Bildkoordinaten und den XY-Landeskoordinaten herbei. Einen solchen Zusammenhang liefert

z.B. eine ebene Ähnlichkeitstransformation ( $x_u, y_u$  sind Translationen,  $m \hat{=}$  Maßstabszahl,  $\alpha \hat{=}$  Drehung):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_u \\ y_u \end{pmatrix} + \frac{1}{m} \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \quad (6.4-8)$$

Die Nichtlinearität in den Unbekannten  $m$  und  $\alpha$  kann durch die Substitution

$$\begin{aligned} m \cdot \cos \alpha &= a \\ m \cdot \sin \alpha &= b \end{aligned} \quad (6.4-9)$$

beseitigt werden. Wir haben damit die linearen Gleichungen:

$$\begin{aligned} x &= x_u + aX - bY \\ y &= y_u + aY + bX \end{aligned} \quad (6.4-10)$$

Die vier Unbekannten  $x_u, y_u, a, b$  kann man aus zwei Paßpunkten bestimmen. Liegen mehr Paßpunkte vor, was in der Praxis üblich ist; folgen aus den Gleichungen (6.4-10) Verbesserungsgleichungen für eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen (Anhang 6.4-1), bei der die Quadratsumme der Residuen ( $\hat{=}$  Verbesserungen)  $v_x$  und  $v_y$  zu einem Minimum gemacht werden:

$$\begin{aligned} v_x &= x_u + aX - bY - x \\ v_y &= y_u + aY + bX - y \end{aligned} \quad (6.4-11)$$

Die Lösung dieser Ausgleichungsaufgabe ist als Helmerttransformation in der Literatur (z.B. Höpke, 1980) bekannt:

$$a = \frac{\sum(\overline{yY} + \overline{xX})}{\sum(\overline{X}^2 + \overline{Y}^2)}, \quad b = \frac{\sum(\overline{yX} - \overline{xY})}{\sum(\overline{X}^2 + \overline{Y}^2)}, \quad \begin{aligned} x_u &= x_s - aX_s + bY_s \\ y_u &= y_s - aY_s - bX_s \end{aligned} \quad (6.4-12)$$

Die mit einem Querstrich versehenen Koordinaten beziehen sich auf die jeweiligen Schwerpunkte  $x_s, y_s$  und  $X_s, Y_s$  der beiden Koordinatensysteme.

Zahlenbeispiel: Gegeben sind 5 Paßpunkte im Bild- und im Landeskoordinatensystem:

Pkt	x	y	$\overline{x}$	$\overline{y}$
1	19.3	287.4 mm	-128.8	144.3 mm
2	290.9	269.3 mm	142.8	126.2 mm
3	145.3	118.3 mm	-2.8	-24.8 mm
4	5.2	24.5 mm	-142.9	-118.6 mm
5	279.9	16.0 mm	131.8	-127.1 mm
Schwerpunkt	148.1	143.1 mm	0	0

Pkt	X	Y	$\bar{X}$	$\bar{Y}$
1	-6350.3	359529.2 m	-29170.4	50099.9 m
2	72397.0	338007.1 m	49576.9	28577.8 m
3	20626.9	302409.6 m	-2193.2	-7019.7 m
4	-26130.0	283170.8 m	-48950.1	-26258.5 m
5	53557.0	264029.8 m	30736.9	-45399.5 m
Schwerpunkt	22820.1	309429.3 m	0	0

$$a = \frac{19894.561 + 21888.970}{12781060000} = 0.3269176 \cdot 10^{-5}$$

$$b = \frac{4000.535 - (-4583.616)}{12781060000} = 0.0671631 \cdot 10^{-5}$$

$$x_u = 0.1481 - 0.0746 + 0.2078 = 0.2813 \text{ m}$$

$$y_u = 0.1431 - 1.0116 - 0.0153 = -0.8838 \text{ m}$$

An Stelle der Ähnlichkeitstransformation (6.4-8) kann man für die erste Stufe auch eine Affintransformation verwenden:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{01} \\ a_{02} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} \\ a_{12} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \quad (6.4-13)$$

Die Affintransformation hat 6 Unbekannte: Zwei Translationen, zwei unterschiedliche Maßstäbe in beiden Koordinatenrichtungen, eine gemeinsame Drehung und einen (von 100 gon abweichenden) Winkel zwischen den beiden Koordinatenrichtungen. Die 6 Unbekannten  $a_{ik}$  kommen im Gleichungssystem (6.4-13) in linearer Form vor, die aus 3 Paßpunkten durch Lösen eines linearen Gleichungssystems und aus mehr als 3 Paßpunkten über eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen (Anhang 6.4-1) gefunden werden können. Auf ein Zahlenbeispiel wird verzichtet. Die Affintransformation wird in der Praxis gerne eingesetzt, da die Scanneraufnahmen in den beiden Koordinatenrichtungen häufig stark unterschiedliche Maßstäbe aufweisen.

2. Stufe: Die ebene Ähnlichkeitstransformation oder die Affintransformation können mit ihren 4 bzw. 6 Transformationsparametern die im Scannerbild in der Regel vorhandenen vielfältigen Verzerrungen nicht vollständig erfassen. Man bekommt nach der Ähnlichkeitstransformation oder Affintransformation an den Paßpunkten verhältnismäßig große Residuen  $v_x$  und  $v_y$ .

Fortsetzung des Zahlenbeispiels: Nach der ebenen Ähnlichkeitstransformation erhält man mittels der Gleichungen (6.4-11) folgende Residuen an den 5 Paßpunkten:

Pkt.	$v_x$	$v_y$
1	-0.23	-0.10 mm
2	0.06	0.53 mm
3	0.33	0.38 mm
4	0.49	-0.11 mm
5	-0.84	-0.67 mm

Die Residuen nach einer ebenen Ähnlichkeitstransformation oder nach einer Affintransformation müssen in der Regel verkleinert werden. Dafür bietet sich z.B. eine Interpolation mittels eines Polynomes an, und zwar getrennt für jede Koordinatenrichtung. Die Anzahl der zu bestimmenden Polynomkoeffizienten  $c_i$  wählt man im allgemeinen etwas kleiner als die Anzahl der Paßpunkte. Dadurch schwingen einerseits die Polynome nicht so stark aus (C 3.3); andererseits geschieht mit einer solchen Interpolation eine wünschenswerte Filterung, d.h. an den Stützpunkten bleiben kleine zufällige Fehler  $r_x, r_y$  übrig.

Fortsetzung des Zahlenbeispiels: Da nach der Ähnlichkeitstransformation in den Residuen  $v_x$  bzw.  $v_y$  keine konstanten und keine linearen Anteile mehr enthalten sind, bieten sich folgende Polynome für eine Interpolation mit den 5 Stützpunkten an:

$$\begin{aligned} v_x &= c_{1x} \bar{x}^2 + c_{2x} \bar{y}^2 + c_{3x} \bar{x}\bar{y} \\ v_y &= c_{1y} \bar{x}^2 + c_{2y} \bar{y}^2 + c_{3y} \bar{x}\bar{y} \end{aligned} \quad (6.4-14)$$

Die Verbesserungsgleichungen für eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen (Anhang 6.4-1) lauten für die x-Koordinate mit  $r_x$  als Verbesserung und  $v_x$  als Beobachtung:

$$\begin{aligned} r_x &= c_{1x} \bar{x}^2 + c_{2x} \bar{y}^2 + c_{3x} \bar{x}\bar{y} - v_x \\ \begin{pmatrix} r_{x1} \\ r_{x2} \\ r_{x3} \\ r_{x4} \\ r_{x5} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 16649 & 20794 & -18606 \\ 20409 & 16060 & 18105 \\ 6 & 596 & 60 \\ 20280 & 14092 & 16905 \\ 17151 & 16325 & -16732 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{1x} \\ c_{2x} \\ c_{3x} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -0.23 \\ 0.06 \\ 0.33 \\ 0.49 \\ -0.84 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (6.4-15)$$

Normalgleichungen (Anhang 6.4-1):

$$10^4 \cdot \begin{pmatrix} 139915 & 123975 & 11560 \\ & 115576 & -13102 \\ \text{symm.} & & 123972 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{1x} \\ c_{2x} \\ c_{3x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -7072 \\ -10430 \\ 27724 \end{pmatrix} \quad (6.4-16)$$



Auflösung der Normalgleichungen:

$$c_{1x} = -0.9111 \cdot 10^{-4} \quad c_{2x} = 0.9333 \cdot 10^{-4} \quad c_{3x} = 0.4072 \cdot 10^{-4} \quad (6.4-17)$$

Die nach der zweiten Stufe noch verbleibenden kleinen Diskrepanzen  $r_x$  können nun mittels der Gleichung (6.4-15) berechnet werden. Sie betragen:

$$r_{x1} = -0.10 \quad r_{x2} = 0.32 \quad r_{x3} = -0.27 \quad r_{x4} = -0.33 \quad r_{x5} = 0.12 \text{ mm.}$$

Aufgabe 6.4-5: Man wiederhole die 2. Stufe für die y-Koordinate. Das Ergebnis lautet:  $c_{1y} = -1.6091 \cdot 10^{-4}$ ,  $c_{2y} = 1.7324 \cdot 10^{-4}$ ,  $c_{3y} = 0.5012 \cdot 10^{-4}$ ,  $r_{y1} = 0.09$ ,  $r_{y2} = -0.12$ ,  $r_{y3} = -0.27$ ,  $r_{y4} = 0.14$ ,  $r_{y5} = -0.10 \text{ mm.}$

Nach Ermittlung der Transformationsparameter für die 1. und 2. Stufe ist der Zusammenhang zwischen den Landeskoordinaten und den Bildkoordinaten hergestellt. Man kann nun im Landeskoordinatensystem die rektifizierte Bildmatrix definieren und die Mittelpunkte dieser Bildelemente in die Matrix des Vorlagebildes transformieren (Bild 6.4-1). Aus der Matrix des Vorlagebildes ermittelt man dann die gesuchten Grauwerte nach einem der im Abschnitt 6.4.1 erläuterten Verfahren.

Fortsetzung des Zahlenbeispiels: Von 4 Bildelement-Mittelpunkten sind die Landeskoordinaten des rektifizierten Bildes bekannt:

Pkt.	X	Y
11	50 000	280 000 m
12	51 000	280 000 m
13	50 000	281 000 m
14	51 000	281 000 m

Gesucht sind die korrespondierenden xy-Bildkoordinaten, um aus der Matrix des Vorlagebildes die Grauwerte zu finden. Mit den Transformationsparametern  $x_u, y_u, a, b$  findet man mit den Gleichungen (6.4-10) eine erste Näherung der gesuchten Bildkoordinaten  $x_{1.}, y_{1.}$ :

Pkt.	$x_{1.}$	$y_{1.}$
11	256.7	65.2 mm
12	260.0	65.8 mm
13	256.0	68.4 mm
14	259.3	69.1 mm

Das Ergebnis ist übrigens noch ein exaktes Quadrat, da in der 1. Stufe ja nur eine Ähnlichkeitstransformation vorgenommen wurde.

Die Bildkoordinaten  $x_{1.}, y_{1.}$  sind noch mit Hilfe der Gleichungen (6.4-14) zu verbessern. Zu diesem Zweck sind sie zuerst auf den Schwerpunkt  $x_s, y_s$  zu beziehen (Ergebnis:  $\bar{x}_{1.}, \bar{y}_{1.}$ ). Dann werden mit (6.4-14) die Korrekturwerte  $v_x, v_y$  berechnet, die von  $x_{1.}, y_{1.}$  abzuziehen sind (Ergebnis:  $x_{2.}, y_{2.}$ ):

Pkt.	$\bar{x}_1$	$\bar{y}_1$	$v_x$	$v_y$	$x_2$	$y_2$
11	108.6	-77.9	-0.85	-1.27	257.55	66.47 mm
12	111.9	-77.3	-0.94	-1.41	260.94	67.21 mm
13	107.9	-74.7	-0.87	-1.31	256.87	69.71 mm
14	111.2	-74.0	-0.95	-1.45	260.25	70.55 mm

Die  $x_2, y_2$ -Koordinaten der vier Punkte spannen kein exaktes Quadrat mehr auf, da das Vorlagebild ja verzerrt ist.<sup>1</sup>

Anstelle einer Polynominterpolation kann in der 2. Stufe die anpassungsfähigere Interpolation nach kleinsten Quadraten (C 3.3.3) verwendet werden. Die Leistungsfähigkeit dieser Methode soll anhand eines Beispielles demonstriert werden. An 74 Paßpunkten treten nach der ebenen Ähnlichkeitstransformation die im Bild 6.4-6 eingetragenen Diskrepanzen auf. Sie betragen in x-Richtung im Mittel  $\pm 86$  m und in y-Richtung  $\pm 72$  m. Die in der 2. Stufe benutzte Interpolation nach kleinsten Quadraten ergibt die im Bild 6.4-7 veranschaulichten Korrekturwerte. Das Ergebnis der geometrischen Rektifizierung zeigt das Bild 6.4-8. Es ist ein Thermalbild, aufgenommen mit einem Daedalus-Scanner (Tab. 3.2-3) in einer Flughöhe von ca. 3350 m. Das Thermalbild ist zusammenkopiert mit einer topographischen Karte 1:50000.

<sup>1</sup> Die maximalen Korrekturwerte  $|v_x|_{\max} = 0.95$  mm und  $|v_y|_{\max} = 1.45$  mm sind in Anbetracht der maximalen Residuen an den 5 Paßpunkten  $|v_x|_{\max} = 0.84$  mm und  $|v_y|_{\max} = 0.67$  mm verhältnismäßig groß. Dieser Sachverhalt ist ein Indiz dafür, daß das Polynom (6.4-14) bei der vorliegenden Paßpunktkonstellation ausschwingt.

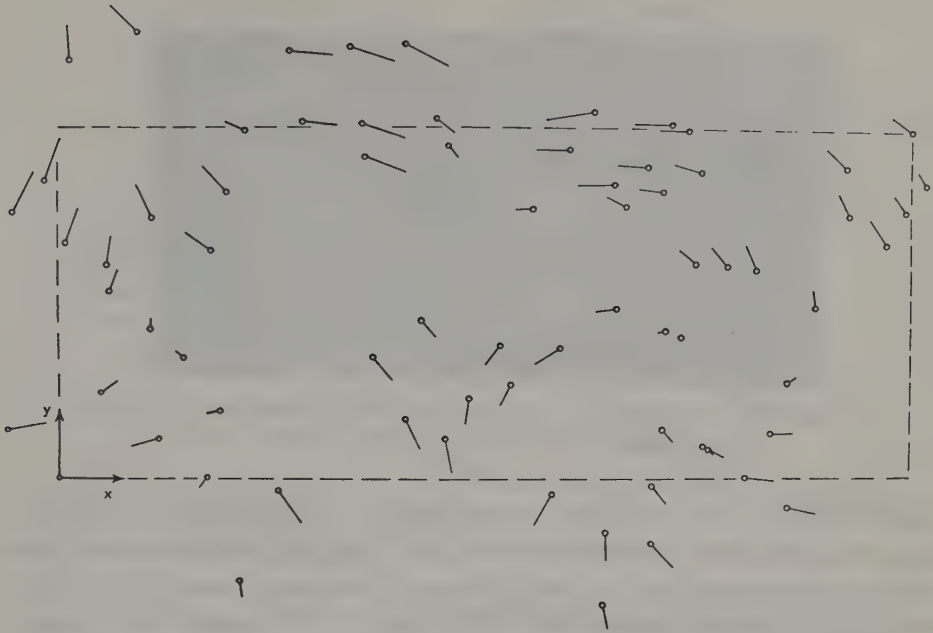


Bild 6.4-6: Residuen an 74 Paßpunkten nach einer ebenen Ähnlichkeitstransformation (Kraus, 1975)

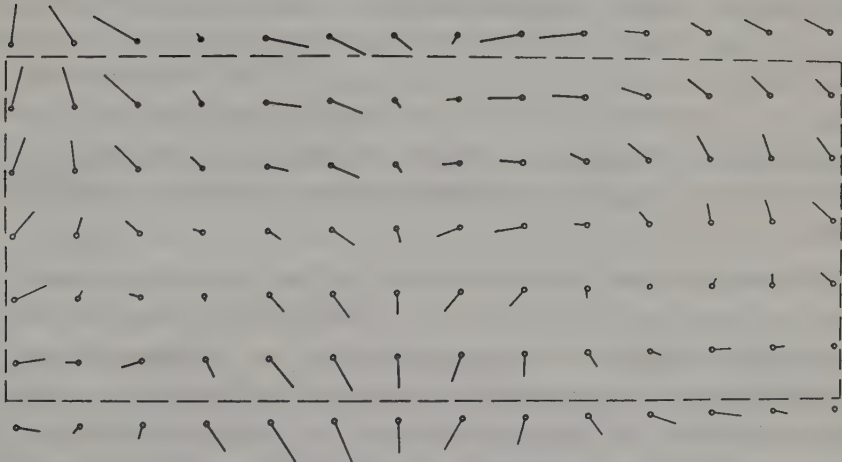


Bild 6.4-7: Verbesserungen ermittelt mit der Interpolation nach kleinsten Quadraten für einen regelmäßigen Raster (Kraus, 1975)



*Bild 6.4-8: Rektifiziertes Thermalbild zusammenkopiert mit einer topographischen Karte 1:50000 (Kraus, 1975)*

Bisher haben wir bei der geometrischen Rektifizierung einen Bildstreifen betrachtet. Bei vielen Projekten werden aber Streifenverbände geflogen, die eine Querüberdeckung von ca. 20% aufweisen. Wenn man jeden Streifen mit Hilfe seiner Paßpunkte geometrisch rektifiziert, ist grundsätzlich auch der Streifenverband geometrisch korrigiert. Eine nur auf Paßpunkte gestützte geometrische Rektifizierung setzt aber voraus, daß besonders an den Streifenrändern viele Paßpunkte platziert sind. Wenn man dagegen im Überlappungsbereich der Streifen sogenannte Verknüpfungspunkte auswählt und sie in der Rektifizierung berücksichtigt (Jansa, 1983), kann man viele Paßpunkte einsparen und man bekommt vor allem einen nahtlosen Übergang von einem Streifen zum Nachbarstreifen. Im Bild 6.4-9 ist ein solcher Streifenverband, bestehend aus 4 Streifen, mit seinen Paß- und Verknüpfungspunkten - vor der Rektifizierung - skizziert. Im Rahmen der Rektifizierung müssen an den 7 Paßpunkten und an den 6 Verknüpfungspunkten Identitäten herbeigeführt werden.

Die nichtparametrische Rektifizierung hat in der Praxis eine beachtliche Verbreitung gefunden, allerdings mehr für die Rektifizierung von Satellitenaufnahmen und weniger für die Rektifizierung von Flugzeugaufnahmen. Für die nichtparametrische Rektifizierung spricht ihre Einfachheit in der Anwendung. Allerdings ist Voraussetzung, daß die Scanneraufnahmen nicht sehr stark verzerrt sind und keine großen Inhomogenitäten aufweisen. Insbesondere bei niedrigen Flughöhen und großen Geländehöhenunterschieden muß man auf die parametrische Rektifizierung übergehen, die die Einbeziehung eines di-



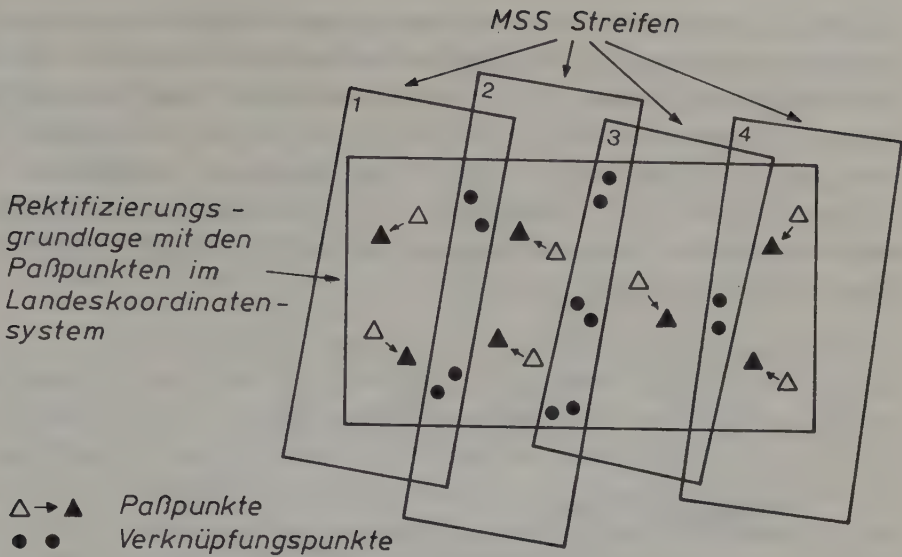


Bild 6.4-9: Paßpunkte und Verknüpfungspunkte eines Bildverbandes

gitalen Geländemodell erlaubt. Die parametrische Lösung, in die auch Informationen über die Flugbahn einbezogen werden können, benötigt in der Regel sehr wenig Paßpunkte. Bevor die parametrische Rektifizierung besprochen wird, sind zunächst die von den einzelnen Flugparametern verursachten Verzerrungen der Scanneraufnahmen zu betrachten.

#### 6.4.2.3 Ursachen der Verzerrungen in den Scanneraufnahmen

Eine Zeile einer Scanneraufnahme kann als Zentralprojektion angesehen werden. Bei einer Aufnahme mit einer digitalen Zeilenkamera ist dieser Sachverhalt unmittelbar aus dem Bild 3.2-25 ersichtlich. Bei einer Aufnahme mit einem Rotationsabtaster stellen wir mit Hilfe der Panoramakorrektur (6.4.2.1) die Geometrie der Zentralprojektion her.

Die Zentralprojektion, d.h. den mathematischen Zusammenhang zwischen dem dreidimensionalen Objektkoordinatensystem (XYZ-System) und dem zweidimensionalen Bildkoordinatensystem (xy-System), beschreiben die Kollinearitätsgleichungen (5.1-5) bzw. (5.1-6). Diese Gleichungen gelten für eine beliebige Aufnahme-richtung ( $\omega$  und  $\phi$ ) und für eine beliebige Kantung ( $\kappa$ ) (Bild 5.1-14).

Unterstellen wir dagegen - wie in der Praxis möglich - genäherte Senkrechtaufnahmen, d.h. wir haben es nur mit kleinen Drehungen  $d\omega, d\phi, dx$  zu tun, so vereinfachen sich die Beziehungen (5.1-6) sehr stark. Diese vereinfachten Beziehungen sind im Abschnitt A 4.2.3.1 abgeleitet. Die Abweichungen von einer idealen Flugbahn werden mit  $dX_0, dY_0, dZ_0$  bezeichnet; außerdem wird horizontales Gelände ( $Z = 0$ ) angenommen. Mit der im Bild 6.4-10 eingeführten speziellen Lage des Objektkoordinatensystems und der Flughöhe  $H$  lauten die linearisierten Gleichungen (5.1-6):

$$\begin{aligned} X &= \frac{H}{c} x + dX_0 + \frac{x}{c} dZ_0 + \frac{xyH}{c^2} d\omega - \left( H + \frac{x^2 H}{c^2} \right) d\phi - \frac{yH}{c} dx \\ Y &= \frac{H}{c} y + dY_0 + \frac{y}{c} dZ_0 + \left( H + \frac{y^2 H}{c^2} \right) d\omega - \frac{xyH}{c^2} d\phi + \frac{xH}{c} dx \end{aligned} \quad (6.4-18)$$

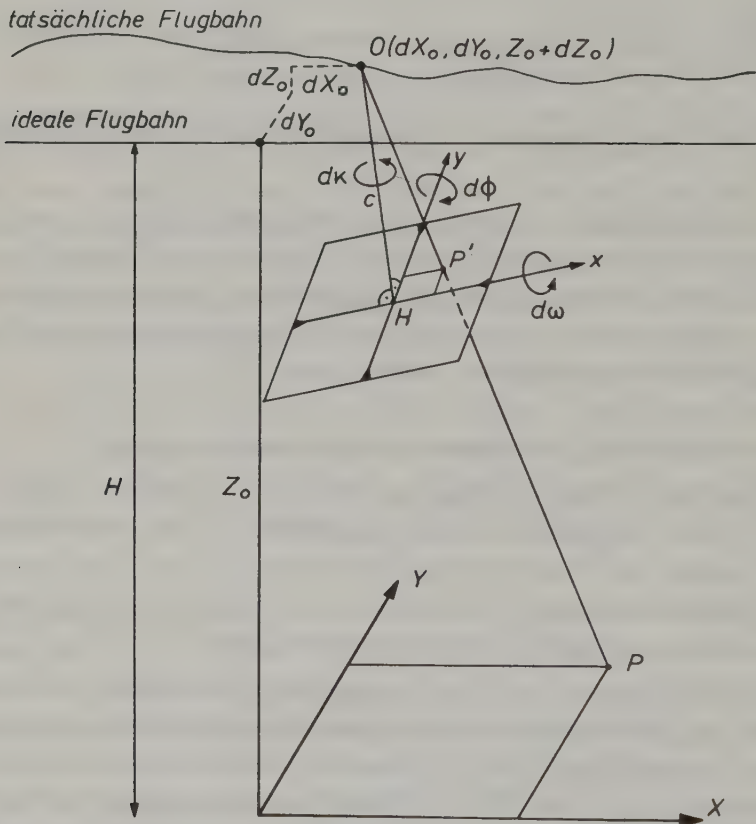


Bild 6.4-10: Zusammenhang zwischen Bild- und Landeskoordinaten für genäherte Senkrechtaufnahmen

Für eine Scanneraufnahme spezialisieren sich die Beziehungen (6.4-18) noch weiter: Nur eine Zeile einer Scanneraufnahme entspricht einer Zentralprojektion, d.h. die x-Koordinate ist - für eine unendlich schmale Zeile - gleich Null. Wir erhalten aus (6.4-18) für  $x = 0$ :

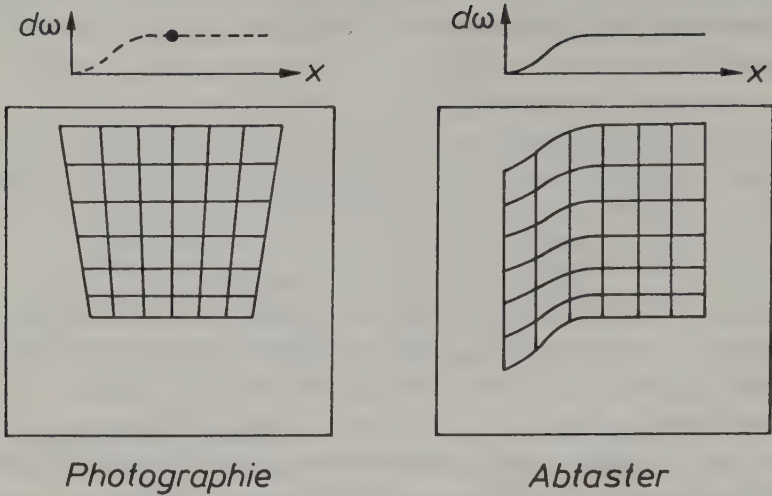
$$\begin{aligned} X &= dX_0 - H \cdot d\phi - \frac{YH}{c} dx \\ Y &= \frac{H}{c} y + dY_0 + \frac{Y}{c} dZ_0 + \left( H + \frac{Y^2 H}{c^2} \right) d\omega \end{aligned} \quad (6.4-19)$$

Die Formeln (6.4-18) und (6.4-19) sollen im folgenden graphisch veranschaulicht werden. Die Formeln (6.4-18) sind charakteristisch für die photographischen Systeme, die Formeln (6.4-19) für Abtaster. Für die graphische Veranschaulichung werden wir in den Bildern einen xy-Quadratraster definieren und die Eckpunkte dieses Quadratrasters in das XY-Landeskoordinatensystem transformieren, wobei jeweils ein Element der äußeren Orientierung  $d\omega, d\phi, dx, dX_0, dY_0, dZ_0$  ungleich Null ist. Bei idealer Flugbahn und exakten Senkrechtaufnahmen könnte man die Bildkoordinaten  $x, y$  mit den Beziehungen

$$X = \frac{H}{c} x \quad Y = \frac{H}{c} y \quad (6.4-20)$$

in die Landeskoordinaten umrechnen.

Für die nun folgende Gegenüberstellung der Verzerrungen in Photographien mit den Verzerrungen in Scanneraufnahmen ist es notwendig, eine einzige Photographie mit einer Serie von Zeilen einer Scanneraufnahme zu vergleichen.

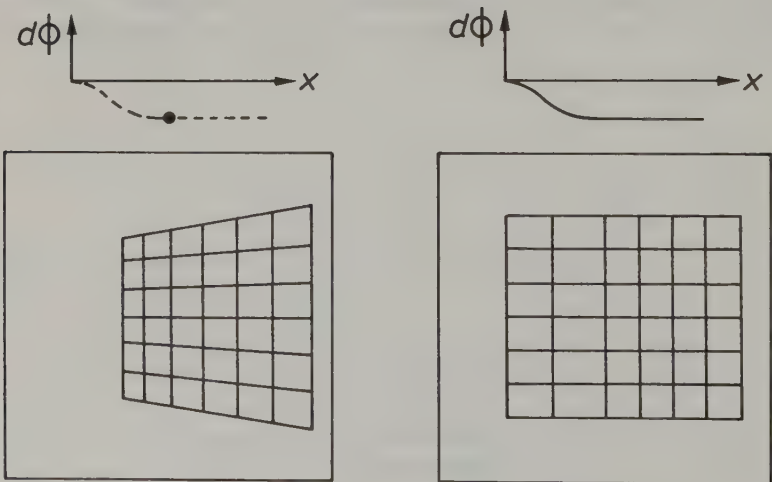
a) Querneigung  $d\omega$ 

Photographie

Abtaster

In einem Photo soll nur die Querneigung  $d\omega$  wirksam sein, die im Zeitpunkt der Belichtung vorhanden ist. Beim Abtaster dagegen spiegelt sich in den Verzerrungen die Variation der Querneigung  $d\omega$  über den ganzen Bildausschnitt wider.

Bei manchen Abtastern wird übrigens die Querneigung bei der Aufnahme mit Hilfe eines Kreiselstabilisierungssystems kompensiert, indem das Fenster 2A (Bild 3.2-1) in Abhängigkeit der Flugzeug-Querneigung  $\omega$  gesteuert wird (Rollkorrektur).

b) Längsneigung  $d\phi$ 

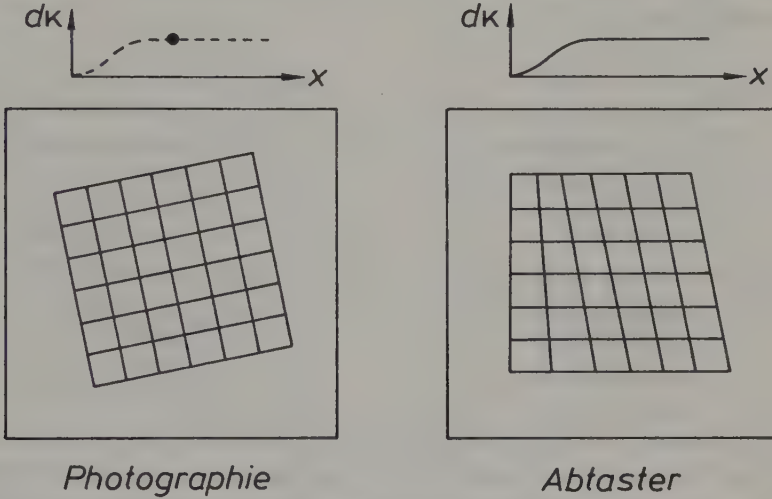
Photographie

Abtaster



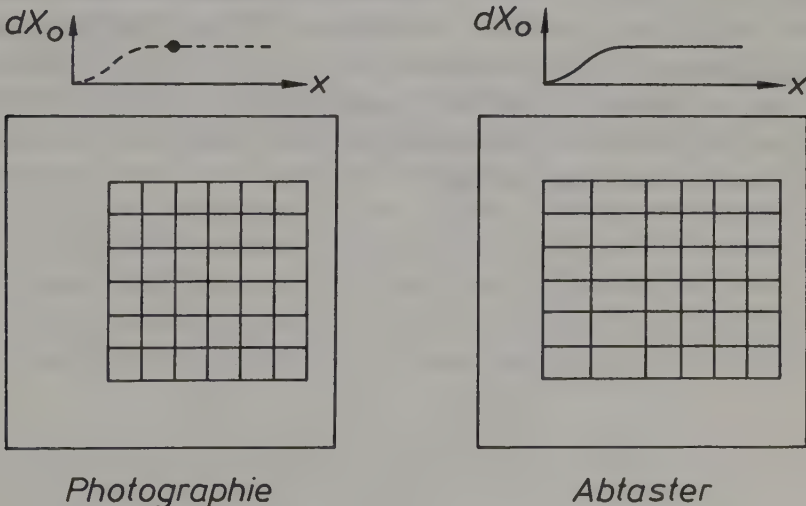
In der Scanneraufnahme bewirkt die Längsneigung  $d\phi$  eine Änderung des Maßstabes in X-Richtung. Außerdem überlappen sich bei positiver Längsneigung die benachbarten Zeilen (overscan). In extremen Fällen kann es sogar zu Doppelabbildungen kommen. Bei negativer Längsneigung gibt es Lücken zwischen den benachbarten Zeilen (underscan).

c) Kantung  $dx$



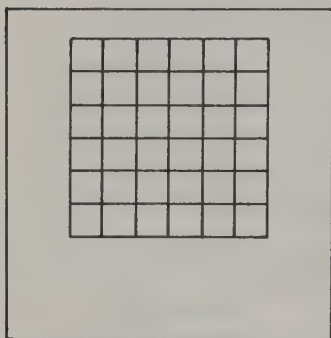
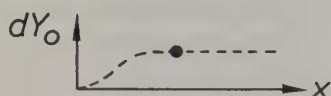
Bei der Photographie führt eine Kantung  $dx$  zu keiner Verzerrung des Bildes: Das Bild ist nur gegenüber dem "Rahmen" verdreht. Das Scannerbild ist dagegen verzerrt. Am Bildrand kann es zu Überlappungen oder Lücken zwischen den benachbarten Zeilen kommen.

d) Translation  $dX_0$  (Fluggeschwindigkeit)

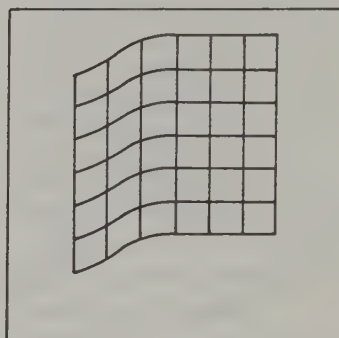
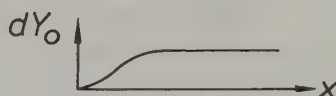


Eine Translation  $dX_0$  tritt dann auf, wenn Schwankungen gegenüber der vorgegebenen Fluggeschwindigkeit auftreten. Bei der Photographie kommt es dadurch zu keinen Verzerrungen, lediglich zu einer falschen Positionierung des Bildes. Schwankungen in der Fluggeschwindigkeit bewirken aber bei der Scanneraufnahme Verzerrungen. Diese Verzerrungen gehorchen dem gleichen mathematischen Bildungsgesetz wie die durch die Längsneigung  $d\phi$  hervorgerufenen Verzerrungen. Es wird daher im Rahmen der Rektifizierung nicht möglich sein, den Anteil der Längsneigung vom Anteil der Geschwindigkeitsänderung zu trennen, zumindest nicht bei horizontalem Gelände.

e) Kursabweichung  $dY_0$

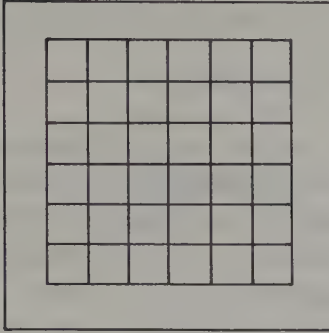
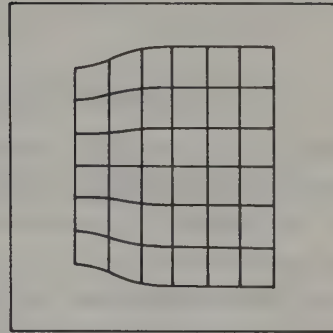
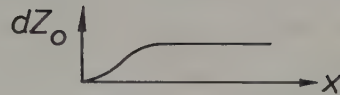


*Photographie*



*Abtaster*

Bei der Photographie kommt es - wie bei der Translation  $dX_0$  - zu keinen Verzerrungen im Bild, sondern nur zu einer falschen Positionierung des Bildes. Beim Scannerbild gibt es Verzerrungen, die denen der Querneigung  $d\omega$  sehr nahe kommen. Bei Scanneraufnahmen mit schmaler Öffnung (in diesem Fall ist  $c$  in der Formel (6.4-19) sehr groß) läßt sich der Anteil der Kursabweichung  $dY_0$  vom Anteil der Querneigung  $d\omega$  im Rahmen einer geometrischen Rektifizierung sehr schwer trennen.

f) Flughöhenänderung  $dZ_0$ *Photographie**Abtaster*

Eine Änderung in der Flughöhe bewirkt eine maßstäbliche Veränderung der Photographie, also keine Verzerrung im Sinne einer ähnlichen Abbildung. Das Scannerbild wird durch die Schwankungen in der Flughöhe nur quer zur Flugrichtung verzerrt. Mit Vergrößerung der Flughöhe wächst die Überlappung der benachbarten Zeilen; eine Verringerung der Flughöhe führt zu Lücken.

g) Geländehöhenunterschiede  $\Delta Z$ 

Die Flughöhenänderung  $dZ_0$  kann auch als Änderung des Höhenniveaus der Geländefläche interpretiert werden, sodaß die im letzten Abschnitt erläuterten Zusammenhänge auch für Änderungen  $\Delta Z$  der Geländefläche zutreffen. In der Praxis hat man es aber selten mit großflächigen Höhenänderungen des Geländes zu tun, sondern auch mit kleinräumigen Höhenunterschieden. Wie solche Höhenunterschiede die Photographie verzerren, wurde im Abschnitt 5.1.1 bereits ausführlich behandelt. Es ist zu erwähnen, daß die Verzerrungen radial vom bzw. zum Bildhauptpunkt nach außen bzw. nach innen verlaufen. Lokale Höhenunterschiede verzerren auch die Scanneraufnahmen, und zwar nur senkrecht zur Flugrichtung. Die Verzerrung kann mit der Formel (5.1-2) berechnet werden, wenn man anstelle des radialen Abstandes  $r$  die  $y$ -Koordinate benutzt.

Aufgabe 6.4-6: Eine Scanneraufnahme die mit einer Breite von 20 cm auf einem Bildausgabegerät wiedergegeben wurde, ist mit einem Öffnungswinkel  $2A = 100$  gon in einer Höhe von 1000 m aufgenommen worden. Wie groß ist die Bildversetzung durch einen Geländehöhenunterschied von  $\Delta Z = 50$  m am Bildrand. Hinweis: Die erforderliche Kammerkonstante  $c$  folgt aus (6.4-7).

Aufgabe 6.4-7: Für die in der Aufgabe 6.4-6 definierte Scanneraufnahme sind die maximalen Verzerrungen herrührend von  $d\omega = \pm 3$  gon bzw.  $d\phi = \pm 4$  gon bzw.  $dx = \pm 5$  gon bzw.  $dX_0 = \pm 100$  m bzw.  $dY_0 = \pm 50$  m bzw.  $dZ_0 = \pm 25$  m zu berechnen.

#### 6.4.2.4 Parametrische Rektifizierung

Im Zuge der parametrischen Rektifizierung bestimmt man die Parameter der Flugbahnen einschließlich der Neigungen und Drehungen der Plattform mit Hilfe von Paßpunkten. Diese Parameter haben wir als Elemente der äußeren Orientierung bezeichnet (5.1.4.1). Die 6 Parameter der äußeren Orientierung für eine aufgenommene Zeile  $i$  lauten (Bild 6.4-11):

- Querneigung  $\omega_i$ , Längsneigung  $\phi_i$  und Kantung  $\kappa_i$ ,
- Koordinaten  $X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}$  des Projektionszentrums  $O_i$ .

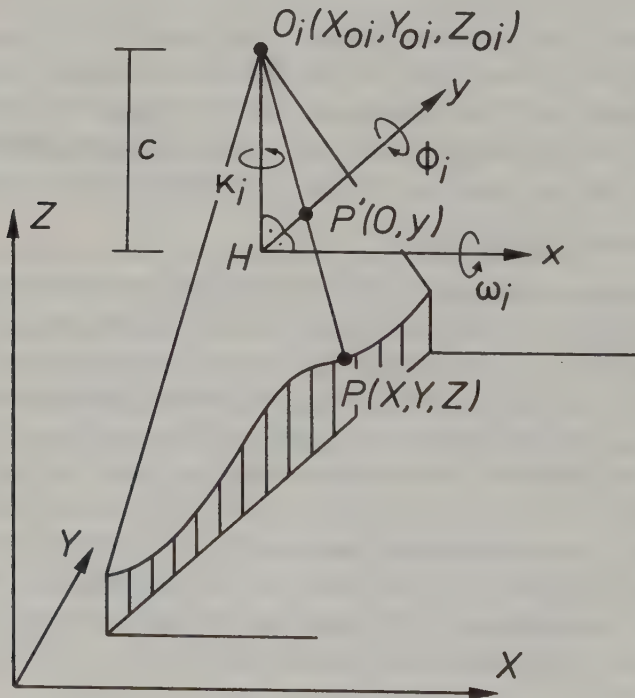


Bild 6.4-11: Die Elemente der äußeren Orientierung einer Bildzeile



Zur Bestimmung der Elemente der äußeren Orientierung aus Paßpunkten, von denen bekanntlich die Bild- und Landeskoordinaten vorliegen müssen, braucht man zunächst den mathematischen Zusammenhang zwischen Bild- und Landeskoordinaten. Diese mathematischen Beziehungen haben wir bereits kennengelernt (Gleichung (5.1-5)):

$$\begin{aligned} x - 0 &= -c \frac{r_{11i}(X - X_{0i}) + r_{21i}(Y - Y_{0i}) + r_{31i}(Z - Z_{0i})}{r_{13i}(X - X_{0i}) + r_{23i}(Y - Y_{0i}) + r_{33i}(Z - Z_{0i})} \\ y &= -c \frac{r_{12i}(X - X_{0i}) + r_{22i}(Y - Y_{0i}) + r_{32i}(Z - Z_{0i})}{r_{13i}(X - X_{0i}) + r_{23i}(Y - Y_{0i}) + r_{33i}(Z - Z_{0i})} \end{aligned} \quad (6.4-21)$$

Hinweise:

- Die x-Bildkoordinate wird Null gesetzt, es sei denn, man will entweder die genaue Position eines Paßpunktes innerhalb eines Bildelementes berücksichtigen oder man hat bei einer Rotation des Abtasters mehrere Bildzeilen simultan erfaßt (Bild 4.2-8).
- Die Kammerkonstante c folgt aus (6.4-7).
- Die Parameter  $r_{11i}, r_{12i}$  usw. sind die Elemente einer räumlichen Drehmatrix, die aus den drei Winkeln  $\omega_i, \phi_i, \kappa_i$  aufgebaut sind (Gleichung (5.1-7)).

Damit aus Paßpunktkoordinaten  $(0, y, X, Y, Z)$  die äußeren Orientierungselemente  $X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}, \omega_i, \phi_i, \kappa_i$  bestimmt werden können, sind die nichtlinearen Gleichungen (6.4-21) zu linearisieren. Zu diesem Zweck braucht man Näherungswerte der unbekannten äußeren Orientierungselemente (z.B.  $\omega_i = \phi_i = 0, \kappa_i, X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}$  aus der Flugplanung 4.1.1.1). Die in eine Taylor-Reihe umgeformten Gleichungen (6.4-21) haben die folgende Form, wobei die für Verbesserungsgleichungen im Sinne einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen (Anhang 6.4-1) üblichen Bezeichnungen eingeführt wurden:

$$\begin{aligned} v_x = & \left( \frac{\partial x}{\partial X_{0i}} \right)^0 dX_{0i} + \left( \frac{\partial x}{\partial Y_{0i}} \right)^0 dY_{0i} + \left( \frac{\partial x}{\partial Z_{0i}} \right)^0 dZ_{0i} + \\ & \left( \frac{\partial x}{\partial \omega_i} \right)^0 d\omega_i + \left( \frac{\partial x}{\partial \phi_i} \right)^0 d\phi_i + \left( \frac{\partial x}{\partial \kappa_i} \right)^0 d\kappa_i - (0 - x^0) \end{aligned} \quad (6.4-22)$$

$$\begin{aligned} v_y = & \left( \frac{\partial y}{\partial X_{0i}} \right)^0 dX_{0i} + \left( \frac{\partial y}{\partial Y_{0i}} \right)^0 dY_{0i} + \left( \frac{\partial y}{\partial Z_{0i}} \right)^0 dZ_{0i} + \\ & \left( \frac{\partial y}{\partial \omega_i} \right)^0 d\omega_i + \left( \frac{\partial y}{\partial \phi_i} \right)^0 d\phi_i + \left( \frac{\partial y}{\partial \kappa_i} \right)^0 d\kappa_i - (\bar{y} - y^0) \end{aligned}$$

Die partiellen Differentialquotienten  $( )^0$ , die im Abschnitt A 5.3.2 explizit angegeben sind, sind mit den Näherungswerten für die äußeren Orientierungselemente zu berechnen.  $x^0$  und  $y^0$  sind gerechnete Bildkoordinaten, die sich aus den Gleichungen (6.4-21) mit Hilfe der Näherungswerte für die äußeren Orientierungselemente ergeben.  $\bar{y}$  sind die beobachteten Bildkoordinaten der Paßpunkte.

Um übersichtliche Tabellen anlegen zu können, werden die Gleichungen (6.4-22) noch etwas kompakter geschrieben:

$$\begin{aligned} v_x &= a_2^0 dx_{0i} + a_3^0 dy_{0i} + a_4^0 dz_{0i} + a_5^0 d\omega_i + a_6^0 d\phi_i + a_7^0 dx_i - (0 - x^0) \\ v_y &= b_2^0 dx_{0i} + b_3^0 dy_{0i} + b_4^0 dz_{0i} + b_5^0 d\omega_i + b_6^0 d\phi_i + b_7^0 dx_i - (\bar{y} - y^0) \end{aligned} \quad (6.4-23)$$

Da ein Paßpunkt zwei Gleichungen vom Typ (6.4-22) bzw. (6.4-23) liefert, sind - auf den ersten Blick - für jede Zeile drei Paßpunkte für die Ermittlung der sechs äußeren Orientierungselemente einer Zeile erforderlich. Die Unsinnigkeit eines solchen Ansatzes liegt auf der Hand. Man muß daher Ausschau halten, ob nicht zusätzliche Informationen vorliegen, die beim bisherigen Ansatz unberücksichtigt blieben.

Man findet die gesuchte Information in der Korrelation der äußeren Orientierungselemente der benachbarten Zeilen. Infolge der Trägheit der bewegten Plattform ändern sich die Parameter in der Regel nur allmählich mit der Flugzeit. Unmittelbar benachbarte Zeilen haben deshalb - nahezu - identische äußere Orientierungselemente. Je größer der Abstand der beiden Zeilen ist, umso mehr differieren die Elemente der äußeren Orientierung.

Den angedeuteten Sachverhalt kann man auf mehrere Arten mathematisch formulieren. Wir beschränken uns auf zwei Verfahren, die mit Differenzengleichungen und mit Polynomapproximation bezeichnet werden. Die beiden Verfahren erläutern wir mit dem im Bild 6.4-12 skizzierten kleinen Beispiel: Das Scannerbild besteht aus  $I = 13$  Zeilen. Für die Bestimmung der äußeren Orientierungselemente stehen nur 5 Paßpunkte zur Verfügung. Im Bild 6.4-12 ist oben das Scannerbild und unten der Grundriß der Bildzeilen im Landeskoordinatensystem wiedergegeben.



Die 10 Verbesserungsgleichungen mit den 30 Unbekannten sind in der Tab. 6.4-13 im oberen Abschnitt angegeben. Mit zusätzlichen (Verbesserungs-)Gleichungen ist die Abhängigkeit der äußeren Orientierungselemente benachbarter Zeilen zu berücksichtigen, indem wir folgende Differenzgleichungen formulieren:

$$\begin{aligned}
 v_{\Delta X_O} &= X_{O,i+\Delta i} - X_{O,i} \\
 v_{\Delta Y_O} &= Y_{O,i+\Delta i} - Y_{O,i} \\
 v_{\Delta Z_O} &= Z_{O,i+\Delta i} - Z_{O,i} \\
 v_{\Delta \omega} &= \omega_{i+\Delta i} - \omega_i \\
 v_{\Delta \phi} &= \phi_{i+\Delta i} - \phi_i \\
 v_{\Delta \kappa} &= \kappa_{i+\Delta i} - \kappa_i
 \end{aligned} \tag{6.4-24}$$

Diese Verbesserungsgleichungen sind zwar linear; sie sind aber trotzdem zu "linearisieren", damit sie zu den Verbesserungsgleichungen (6.4-22) bzw. (6.4-23) passen. Die erste Gleichung (6.4-24) lautet z.B. mit den Näherungswerten  $X_{O,i+\Delta i}^0$  und  $X_{O,i}^0$ :

$$v_{\Delta X_O} = dX_{O,i+\Delta i} - dX_{O,i} - (X_{O,i}^0 - X_{O,i+\Delta i}^0) \tag{6.4-25}$$

Die Gewichte  $p_{\Delta X_O}, p_{\Delta Y_O}, p_{\Delta Z_O}, p_{\Delta \omega}, p_{\Delta \phi}, p_{\Delta \kappa}$  werden reziprok zu den Quadraten der mittleren Fehler, also wie folgt angesetzt:

$$p_{\Delta X_O} = 1/\sigma_{\Delta X_O}^2, \quad p_{\Delta Y_O} = 1/\sigma_{\Delta Y_O}^2, \quad p_{\Delta Z_O} = 1/\sigma_{\Delta Z_O}^2, \quad p_{\Delta \omega} = 1/\sigma_{\Delta \omega}^2 \quad \text{usw.} \tag{6.4-26}$$

Die Quadrate der mittleren Fehler folgen aus dem Fehlerfortpflanzungsgesetz mit Berücksichtigung der Kovarianzen zwischen den äußeren Orientierungselementen. Das Fehlerfortpflanzungsgesetz - in anderen Büchern (z.B. Mikhail, 1979) auch als Fortpflanzung von Varianzen und Kovarianzen bezeichnet - lautet z.B. für die Differenz des  $\omega$ -Elementes:

$$\sigma_{\Delta \omega}^2 = (1 \ -1) \begin{pmatrix} v_{\omega\omega} & C_{\omega}(\Delta i) \\ C_{\omega}(\Delta i) & v_{\omega\omega} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} = 2v_{\omega\omega} - 2C_{\omega}(\Delta i) \tag{6.4-27}$$

$v_{\omega\omega} \hat{=}$  Varianz der Querneigung  $\omega$  (die Varianz ist bekanntlich das Quadrat der Standardabweichung  $\sigma_{\omega}$  bzw. des mittleren Fehlers).  
 $C_{\omega}(\Delta i) \hat{=}$  Kovarianz der  $\omega$ -Drehung zwischen den beiden Zeilen, die um  $\Delta i$  auseinanderliegen.

Die Varianz und die Kovarianz entnimmt man schließlich sogenannten Kovarianzfunktionen. Für die Querneigung  $\omega$  hat z.B. die Kovarianzfunktion  $C_{\omega}(\Delta i)$  in Abhängigkeit des Intervalles  $\Delta i$  folgendes Aussehen (Bild 6.4-14):

$$C_{\omega}(\Delta i) = C_{\omega}(0) \cdot e^{-\frac{\Delta i}{c_{\omega}}} \tag{6.4-28}$$



	$X_0 Y_0 Z_0 \omega_1 \phi_1 \kappa_1$	$X_2 Y_2 Z_2 \omega_2 \phi_2 \kappa_2$	$X_7 Y_7 Z_7 \omega_7 \phi_7 \kappa_7$	$X_{011} Y_{011} Z_{011} \omega_{11} \phi_{11} \kappa_{11}$	$X_{013} Y_{013} Z_{013} \omega_{13} \phi_{13} \kappa_{13}$	l
Bildkoordinaten	$\begin{matrix} v_{x1} \\ v_{y1} \\ v_{x2} \\ v_{y2} \\ v_{x3} \\ v_{y3} \\ v_{x4} \\ v_{y4} \\ v_{x5} \\ v_{y5} \end{matrix}$	$\begin{matrix} a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_7 \\ b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 & b_7 \end{matrix}$	$\begin{matrix} a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_7 \\ b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 & b_7 \end{matrix}$	$\begin{matrix} a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_7 \\ b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 & b_7 \end{matrix}$	$\begin{matrix} a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_7 \\ b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 & b_7 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0-x \\ -y_1-y_1 \\ 0-x \\ -y_2-y_2 \\ 0-x \\ -y_3-y_3 \\ 0-x \\ -y_4-y_4 \\ 0-x \\ -y_5-y_5 \end{matrix}$
Differenz 1,2	$\begin{matrix} v_{\Delta x_0} \\ v_{\Delta y_0} \\ v_{\Delta z_0} \\ v_{\Delta \omega} \\ v_{\Delta \phi} \\ v_{\Delta \kappa} \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{matrix}$				$\begin{matrix} X_{01}^0 - X_{02}^0 \\ Y_{01}^0 - Y_{02}^0 \\ Z_{01}^0 - Z_{02}^0 \\ \omega_1^0 - \omega_2^0 \\ \phi_1^0 - \phi_2^0 \\ \kappa_1^0 - \kappa_2^0 \end{matrix}$
Differenz 4,5	$\begin{matrix} v_{\Delta x_0} \\ v_{\Delta y_0} \\ v_{\Delta z_0} \\ v_{\Delta \omega} \\ v_{\Delta \phi} \\ v_{\Delta \kappa} \end{matrix}$			$\begin{matrix} -1 & & & & & \\ & -1 & & & & \\ & & -1 & & & \\ & & & -1 & & \\ & & & & -1 & \\ & & & & & -1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} X_{04}^0 - X_{05}^0 \\ Y_{04}^0 - Y_{05}^0 \\ Z_{04}^0 - Z_{05}^0 \\ \omega_4^0 - \omega_5^0 \\ \phi_4^0 - \phi_5^0 \\ \kappa_4^0 - \kappa_5^0 \end{matrix}$
weitere Differenzengleichungen						

Tab. 6.4-13: Verbesserungsgleichungen für eine geometrische Rektifizierung mit Differenzengleichungen (Bild 6.4-12 enthält die Paßpunktanordnung)

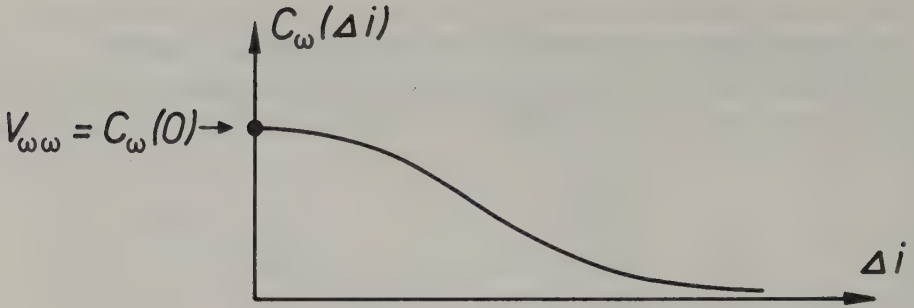


Bild 6.4-14: Kovarianzfunktion für die Querneigung  $\omega$

Die Kovarianzfunktion ist mit den beiden Parametern  $C_\omega(0)$  und  $c_\omega$  festgelegt.  $C_\omega(0)$  entspricht der Varianz  $V_{\omega\omega}$  der Querneigung  $\omega$ . Die Kovarianz  $C_\omega(\Delta i)$  geht in die Varianz  $V_{\omega\omega}$  über, wenn  $\Delta i = 0$  wird, d.h. wenn es sich um zwei identische Zeilen handelt.  $c_\omega$  ist ein Parameter, mit dem die Neigung der Kovarianzfunktion im mittleren Bereich bzw. die Halbwertsweite festgelegt wird. Die beiden Parameter  $C(0)$  und  $c$  sind für die einzelnen Elemente der äußeren Orientierung bekannt (z.B. Rose, 1984 und Schuhr, 1982). Man kann sie mit dem im Abschnitt C 3.3.3 beschriebenen Analyseverfahren aus den Ergebnissen von Bündeltriangulationen (A 5.3) mit Luft- bzw. Weltraumbildern ableiten. Es ist beruhigend, daß die Kovarianzfunktionen nicht sehr genau bekannt sein müssen.

Für unser Beispiel (Bild 6.4-12) bieten sich zunächst einmal Differenzengleichungen für die Paßpunktpaare 1,2 und 4,5 an. Diese zusätzlichen 12 Verbesserungsgleichungen sind in die Tab. 6.4-13 aufgenommen. Damit haben wir insgesamt erst 22 Verbesserungsgleichungen für die Bestimmung der 30 Unbekannten. Weitere Differenzengleichungen sind hinzuzufügen, z.B. jeweils 6 Verbesserungsgleichungen für die Punktpaare 1,3 2,3 3,4 und 3,5. Allgemein betrachtet sind für alle Punktpaare Differenzengleichungen anzugeben, die einen Abstand  $\Delta i$  haben, für die die Kovarianz (Bild 6.4-14 z.B. für das  $\omega$ -Element) noch nennenswert ist.

Anhand dieser Überlegungen kann man auch die erforderliche Paßpunktanzahl für eine geometrische Rektifizierung formulieren:

Man braucht mindestens drei Paßpunkte in einem Bereich,  
in dem die Flugparameter noch korreliert sind.

Das Verbesserungsgleichungssystem der Tab. 6.4-13 lautet in Matrizen-schreibweise:

$$\underline{v} = \underline{A} \underline{x} - \underline{1} \quad \text{Gewichtsmatrix } \underline{P}_{11} \quad (6.4-29)$$

Daraus folgen die Normalgleichungen und ihre Auflösung (Anhang 6.4-1):

$$\underline{A}^T \underline{P}_{11} \underline{A} \underline{x} = \underline{A}^T \underline{P}_{11} \underline{1} \quad (6.4-30)$$

$$\underline{x} = (\underline{A}^T \underline{P}_{11} \underline{A})^{-1} \underline{A}^T \underline{P}_{11} \underline{1} \quad (6.4-31)$$

Das Ergebnis  $\underline{x}$  sind die äußeren Orientierungselemente aller Zeilen, in denen ein oder mehrere Paßpunkte liegen. Die äußeren Orientierungselemente der dazwischenliegenden Zeilen bekommt man durch Interpolation, vorteilhaft mittels Spline-Funktion (C 3.2.2.2).

Gibt es totale Abhängigkeiten innerhalb der Unbekannten  $\underline{x}$ , kann die Normalgleichungsmatrix  $(\underline{A}^T \underline{P}_{11} \underline{A})$  nicht invertiert werden. Man soll aber nicht nur total abhängige sondern auch schlecht konditionierte Normalgleichungen vermeiden. Bei einer geometrischen Rektifizierung treten häufig schlecht konditionierte Normalgleichungen auf: Bei horizontalem Gelände sind die Längsneigung  $d\phi$  und die Translation  $dX_0$  total voneinander abhängig (6.4.2.3 b und d); bei horizontalem Gelände und Abtaster mit schmaler Öffnung sind die Querneigung  $d\omega$  und die Kursabweichung  $dY_0$  stark voneinander abhängig (6.4.2.3 a und e). Die mit der totalen bzw. starken Abhängigkeit verbundene Überparametrisierung des Gleichungssystems umgeht man dadurch, daß man von den beiden abhängigen Unbekannten nur eine im Gleichungssystem beläßt.

Bisher haben wir uns auf die geometrische Rektifizierung eines Streifens beschränkt. Den Streifenverband, wie er in der Praxis häufig vorkommt, kann man in der Weise rektifizieren, daß man jeden Streifen für sich mittels der bisher erläuterten Methode behandelt. Eine mathematisch anspruchsvollere Bearbeitung besteht darin, daß man auch Verknüpfungspunkte im Überlappungsbereich der benachbarten Streifen (siehe Bild 6.4-9) berücksichtigt. Bei der parametrischen Rektifizierung sind zu diesem Zweck in die Verbesserungsgleichungen (6.4-22) bzw. (6.4-23) zusätzliche Terme für die drei unbekannten Landeskoordinaten  $X, Y, Z$  aufzunehmen (wie bei den Verbesserungsgleichungen A(5-29) einer photogrammetrischen Bündeltriangulation). Jeder Verknüpfungspunkt liefert also drei zusätzliche unbekannte Landeskoordinaten und in der Regel  $6 \times 2 = 12$  unbekannte äußere Orientierungselemente für die beiden betroffenen Zeilen, in denen der Verknüpfungspunkt liegt. Aus den Bildkoordinaten der beiden Streifen ergeben sich für einen Verknüpfungspunkt vier Verbesserungsgleichungen. Für jede Nachbarschaft eines Verknüpfungspunktes innerhalb eines Streifens zu einem anderen Verknüpfungspunkt oder Paßpunkt ergeben sich sechs zusätzliche Differenzgleichungen (6.4-24), sodaß Verknüpfungspunkte einen Streifenverband wesentlich stabilisieren im Vergleich zu einer getrennten, nur auf Paßpunkten gestützten Rektifizierung der Einzelstreifen.

Den mathematischen Ansatz für die geometrische Rektifizierung haben wir unter der Annahme formuliert, daß das Projektionszentrum O im Abstand  $c$  vor dem mittleren Bildelement liegt und diese sogenannte innere Orientierung bekannt ist (Gleichung (6.4-21) und Bild 6.4-11). Manchmal kennt man die innere Orientierung einer Scanneraufnahme aber nicht und soll trotzdem eine geometrische Rektifizierung durchführen. In diesem Fall muß man die Parameter der inneren Orientierung als Unbekannte in die Verbesserungsgleichungen (6.4-22) bzw. (6.4-23) aufnehmen. Die verwandte Problemstellung in der

Photogrammetrie ist in den Kapiteln A 5.3.5, B 5.3 und B 6.3 beschrieben.

Auf der anderen Seite liefern Zusatzeinrichtungen bei modernen Plattformen Informationen über Flugparameter, die wir bisher in den Verbesserungsgleichungen (6.4-22) bzw. (6.4-23) als Unbekannte eingeführt haben. Jene Flugparameter, die sozusagen beobachtet sind, eliminiert man in den Verbesserungsgleichungen oder es werden - wenn sie nur mit einer gewissen Genauigkeit beobachtet sind - zusätzliche Verbesserungsgleichungen mit entsprechenden Gewichten hinzugefügt (siehe Abschnitt B 6.2).

Schließlich soll noch erwähnt werden, daß Paß- und Verknüpfungspunkte zwar die wichtigsten, aber nicht immer die zweckdienlichsten Einpaßelemente sind. Andere Einpaßelemente wie gerade oder gekrümmte Linien und flächige Informationen wie z.B. Punkte in Ebenen oder Polynomflächen werden in der geometrischen Rektifizierung immer mehr an Bedeutung gewinnen (photogrammetrische Analogie siehe Abschnitt E 6.1).

Aufgabe 6.4-8: Man bilde das partielle Differential  $(\partial x / \partial X_{0i})^0$  und man überlege sich seine Vereinfachung für folgende Näherungswerte:  $\omega^0 = \phi^0 = \kappa^0 = 0$ , d.h. die räumliche Drehmatrix R ist die Einheitsmatrix E.

Aufgabe 6.4-9: Man berechne die Gewichte für zwei Differenzengleichungen (6.4-24). Im ersten Fall beträgt der Abstand der beiden Paßpunkte  $\Delta i = 54$  Zeilen und im zweiten Fall  $\Delta i = 82$  Zeilen. Die beiden Parameter der Kovarianzfunktion (6.4-28) lauten:  $C_\omega(0) = 10 \text{ gon}^2$ ,  $c_\omega = 50$ .

Aufgabe 6.4-10: Die Tabelle 6.4-13 ist um die Differenzengleichungen für die Punktepaae 1,3 2,3 3,4 und 3,5 zu erweitern.

Aufgabe 6.4-11: Wie ist das Verbesserungsgleichungssystem der Tab. 6.4-13 abzuwandeln, wenn - bei horizontalem Gelände - totale Abhängigkeit der Längsneigung  $d\phi$  und Kursabweichung  $dX_0$  besteht?

Aufgabe 6.4-12: Wie ist das Verbesserungsgleichungssystem der Tab. 6.4-13 abzuwandeln, wenn von dem zu rektifizierenden Flugstreifen der Gesamtöffnungswinkel  $2A$  und damit die Kammerkonstante  $c$  des Abtasters nicht bekannt ist?

Aufgabe 6.4-13: Wie ist das Verbesserungsgleichungssystem der Tab. 6.4-13 abzuwandeln, wenn die drei Drehungen  $\omega, \phi, \kappa$  der Plattform mit Navigationsinstrumenten während des Fluges genau aufgezeichnet werden?

b) Polynomapproximation. Bei diesem Ansatz wird die Variation der äußeren Orientierungselemente entlang des Flugstreifens durch Polynome angenähert. Der Grad der Polynome wird abhängig von der Länge des Flugstreifens und damit indirekt von der Anzahl der Paßpunkte gewählt. Wir beschränken uns bei der Erklärung der Methode auf lineare Polynome, d.h. für den zu rektifizierenden Streifen werden konstante Anteile  $dX_{0s}, dY_{0s}, dZ_{0s}, d\omega_s, d\phi_s, d\kappa_s$  und mit dem Index  $i$  wachsende Anteile  $kX_{0s}, kY_{0s}, kZ_{0s}, k\omega_s, k\phi_s, k\kappa_s$  gewählt:



$$\begin{aligned}
 dX_{0i} &= dX_{0s} + kX_{0s} \cdot i \\
 dY_{0i} &= dY_{0s} + kY_{0s} \cdot i \\
 dZ_{0i} &= dZ_{0s} + kZ_{0s} \cdot i \\
 d\omega_i &= d\omega_s + k\omega_s \cdot i \\
 d\phi_i &= d\phi_s + k\phi_s \cdot i \\
 d\chi_i &= d\chi_s + k\chi_s \cdot i
 \end{aligned}
 \tag{6.4-32}$$

Die individuellen äußeren Orientierungselemente  $dX_{0i}, dY_{0i}, dZ_{0i}, d\omega_i, d\phi_i, d\chi_i$  der Verbesserungsgleichungen (6.4-22) bzw. (6.4-23) können mittels (6.4-32) durch zwei Parameter für jedes Orientierungselement ersetzt werden. Auf diese Weise haben wir für einen Streifen nur noch 12 Unbekannte. Zur Bestimmung dieser 12 Unbekannten liefert jeder Paßpunkt zwei Verbesserungsgleichungen. Für die fünf Paßpunkte des im Bild 6.4-12 eingeführten Beispiels sind die 10 Verbesserungsgleichungen in der Tab. 6.4-15 zusammengefaßt, wobei die in den Gleichungen (6.4-23) eingeführten Abkürzungen  $a^0, b^0$  für die partiellen Differentialquotienten benutzt wurden.

Für die Bestimmung der 12 Unbekannten würde man mindestens sechs Paßpunkte benötigen. Zur Beseitigung dieser Überparametrisierung gibt es nicht nur diese sondern insgesamt drei verschiedene Möglichkeiten:

- Mindestens ein zusätzlicher Paßpunkt oder
- Reduzierung um ein äußeres Orientierungselement, z.B. um die Parameter  $d\phi_s, k\phi_s$ , die bei horizontalem Gelände vollkommen mit den Parametern  $dX_{0s}, kX_{0s}$  korreliert sind, oder
- Reduktion des Polynomgrades, z.B. Beschränkung auf die sechs konstanten Anteile in den Gleichungen (6.4-32).

Das entsprechend ergänzte Verbesserungsgleichungssystem der Tab. 6.4-15 lautet in Matrixschreibweise:

$$\underline{v} = \underline{Ax} - \underline{l} \tag{6.4-33}$$

Falls alle Bildkoordinaten  $0, \bar{y}$  mit gleicher Genauigkeit bekannt sind, kann auf eine Gewichtsmatrix verzichtet werden. Die Normalgleichungen und ihre Auflösung lauten dann (Anhang 6.4-1):

$$\underline{A}^T \underline{Ax} = \underline{A}^T \underline{l} \tag{6.4-34}$$

$$\underline{x} = (\underline{A}^T \underline{A})^{-1} \underline{A}^T \underline{l} \tag{6.4-35}$$

Das Ergebnis  $\underline{x}$  sind in diesem Fall die äußeren Orientierungselemente wie sie in den Gleichungen (6.4-32) definiert sind. Mit dem Index  $i$  kann man für jede Zeile des Streifens die äußeren Orientierungselemente berechnen.

	$dx_{0s}$	$kx_{0s}$	$dy_{0s}$	$ky_{0s}$	$dZ_{0s}$	$kZ_{0s}$	$d\omega_s$	$k\omega_s$	$d\phi_s$	$k\phi_s$	$dx_s$	$kx_s$	l
$v_{x1}$	$a_2^0$	$a_2^0 \cdot 1$	$a_3^0$	$a_3^0 \cdot 1$	$a_4^0$	$a_4^0 \cdot 1$	$a_5^0$	$a_5^0 \cdot 1$	$a_6^0$	$a_6^0 \cdot 1$	$a_7^0$	$a_7^0 \cdot 1$	$0 - x_1^0$
$v_{y1}$	$b_2^0$	$b_2^0 \cdot 1$	$b_3^0$	$b_3^0 \cdot 1$	$b_4^0$	$b_4^0 \cdot 1$	$b_5^0$	$b_5^0 \cdot 1$	$b_6^0$	$b_6^0 \cdot 1$	$b_7^0$	$b_7^0 \cdot 1$	$\bar{y}_1 - y_1^0$
$v_{x2}$	$a_2^0$	$a_2^0 \cdot 2$	$a_3^0$	$a_3^0 \cdot 2$	$a_4^0$	$a_4^0 \cdot 2$	$a_5^0$	$a_5^0 \cdot 2$	$a_6^0$	$a_6^0 \cdot 2$	$a_7^0$	$a_7^0 \cdot 2$	$0 - x_2^0$
$v_{y2}$	$b_2^0$	$b_2^0 \cdot 2$	$b_3^0$	$b_3^0 \cdot 2$	$b_4^0$	$b_4^0 \cdot 2$	$b_5^0$	$b_5^0 \cdot 2$	$b_6^0$	$b_6^0 \cdot 2$	$b_7^0$	$b_7^0 \cdot 2$	$\bar{y}_2 - y_2^0$
$v_{x3}$	$a_2^0$	$a_2^0 \cdot 8$	$a_3^0$	$a_3^0 \cdot 8$	$a_4^0$	$a_4^0 \cdot 8$	$a_5^0$	$a_5^0 \cdot 8$	$a_6^0$	$a_6^0 \cdot 8$	$a_7^0$	$a_7^0 \cdot 8$	$0 - x_3^0$
$v_{y3}$	$b_2^0$	$b_2^0 \cdot 8$	$b_3^0$	$b_3^0 \cdot 8$	$b_4^0$	$b_4^0 \cdot 8$	$b_5^0$	$b_5^0 \cdot 8$	$b_6^0$	$b_6^0 \cdot 8$	$b_7^0$	$b_7^0 \cdot 8$	$\bar{y}_3 - y_3^0$
$v_{x4}$	$a_2^0$	$a_2^0 \cdot 13$	$a_3^0$	$a_3^0 \cdot 13$	$a_4^0$	$a_4^0 \cdot 13$	$a_5^0$	$a_5^0 \cdot 13$	$a_6^0$	$a_6^0 \cdot 13$	$a_7^0$	$a_7^0 \cdot 13$	$0 - x_4^0$
$v_{y4}$	$b_2^0$	$b_2^0 \cdot 13$	$b_3^0$	$b_3^0 \cdot 13$	$b_4^0$	$b_4^0 \cdot 13$	$b_5^0$	$b_5^0 \cdot 13$	$b_6^0$	$b_6^0 \cdot 13$	$b_7^0$	$b_7^0 \cdot 13$	$\bar{y}_4 - y_4^0$
$v_{x5}$	$a_2^0$	$a_2^0 \cdot 15$	$a_3^0$	$a_3^0 \cdot 15$	$a_4^0$	$a_4^0 \cdot 15$	$a_5^0$	$a_5^0 \cdot 15$	$a_6^0$	$a_6^0 \cdot 15$	$a_7^0$	$a_7^0 \cdot 15$	$0 - x_5^0$
$v_{y5}$	$b_2^0$	$b_2^0 \cdot 15$	$b_3^0$	$b_3^0 \cdot 15$	$b_4^0$	$b_4^0 \cdot 15$	$b_5^0$	$b_5^0 \cdot 15$	$b_6^0$	$b_6^0 \cdot 15$	$b_7^0$	$b_7^0 \cdot 15$	$\bar{y}_5 - y_5^0$
	weitere Paßpunkte												

Tab.6.4-15: Verbesserungsgleichungen für eine geometrische  
Rektifizierung mit linearen Polynomen  
(Bild 6.4-12 enthält die Paßpunktanordnung)

Eine Erweiterung auf einen Streifenverband ist leicht möglich: Für jeden Verknüpfungspunkt fallen zusätzlich drei unbekannte Landeskoordinaten  $X, Y, Z$  aber keine zusätzlichen unbekannten äußeren Orientierungselemente an. Da jeder Verknüpfungspunkt aber 4 zusätzliche Verbesserungsgleichungen bringt, tragen Verknüpfungspunkte zur Stabilisierung des Streifenverbandes bei.

Hinsichtlich

- einer unbekannten inneren Orientierung,
  - der Berücksichtigung bekannter Flugparameter und
  - der Berücksichtigung von nichtpunktförmigen Einpaßelementen
- ist die Polynomapproximation etwa genauso adaptionsfähig wie die Methode mit den Differenzengleichungen.

Aufgabe 6.4-14: Wieviel Paßpunkte sind in einem Streifen mindestens erforderlich, wenn die 6 Elemente der äußeren Orientierung mit quadratischen Polynomen approximiert werden sollen ?

Aufgabe 6.4-15: Bei Verwendung nur konstanter Parameter in den Gleichungen (6.4-32) sind für einen Streifen offensichtlich nur 3 Paßpunkte erforderlich. Beim sogenannten räumlichen Rückwärtsschnitt (5.1.4.1) benötigt man ebenfalls 3 Paßpunkte für die Bestimmung der äußeren Orientierung. Man veranschauliche den Unterschied zwischen einem räumlichen Rückwärtsschnitt und einer parametrischen Rektifizierung, bei der Polynome nur mit konstanten Anteilen benutzt werden.

Sowohl die geometrische Rektifizierung mittels Polynomapproximation als auch die geometrische Rektifizierung mittels Differenzengleichungen liefert für jede Zeile eines Scannerbildes die 6 Elemente der äußeren Orientierung. Damit können zu vorgegebenen XY-Landeskoordinaten noch nicht die entsprechenden xy-Bildstellen für eine Überführung einer gegebenen Bildmatrix in eine im Landeskoordinatensystem definierte Bildmatrix gefunden werden. Die Gleichungen (6.4-21) sagen uns, daß wir dafür noch die Z-Koordinaten, also die Geländehöhen, an den einzelnen XY-Stellen benötigen. Die Z-Koordinaten zu einem XY-Quadratraster sind im allgemeinen in topographischen Informationssystemen (5.1.4.4) gespeichert. Man kann also festhalten, daß Scanneraufnahmen mit den parametrischen Methoden nur dann geometrisch rektifiziert werden können, wenn im Interessensgebiet digitale Geländemodelle vorhanden sind.

Hinweis: Die Berechnung der jeweiligen Bildstelle zu vorgegebenen XYZ-Koordinaten mittels der Gleichungen (6.4-21) kann nur iterativ erfolgen. Man weiß nämlich nicht die Zeile  $i$ , in der der gesuchte Bildpunkt liegt. Die Iteration ist zu beenden, wenn man die Bildzeile gefunden hat, mit der die Transformation (6.4-21) zu einer  $x$ -Bildkoordinate = 0 führt.

Zusätzliche Literatur: Ebner (1976), Konecny et al. (1986), Larsson (1980), Mc Glone, Mikhail (1981) mit sehr vielen Literaturangaben.

### 6.4.3 Rektifizierung der mit Abtastern in Satelliten aufgenommenen Bilder

Die Satellitenbahnen sind verhältnismäßig stabil und näherungsweise bekannt (4.2.1). Man kann deshalb - ohne Paßpunkte - geometrische Korrekturen an den Bildern vornehmen. Sie werden als Vorkorrektur bezeichnet; sie werden - abhängig vom jeweiligen Satellitenprogramm - verschieden weit getrieben. Auf jeden Fall wird die Panoramaverzerrung korrigiert (6.4.2.1) und die Versetzung der benachbarten Bildzeilen infolge der Erdrotation während der Aufnahme (z.B. 4.2.2) berücksichtigt. Zusätzlich kann die Vorkorrektur noch eine Berücksichtigung der Erdkrümmung umfassen, indem z.B. in den Mittelpunkt einer Bildszene eine Tangentialebene an die Erdkugel gelegt und das korrigierte Bild als Abbild auf diese Ebene hergestellt wird. Anstelle dieser Polyederflächen kann - da die Satellitenbahn ja näherungsweise bekannt ist - auch eine Abbildung in das weltweite UTM-System (universal-transvers-mercator-system) erfolgen.

Für eine genauere Rektifizierung bietet sich bei Satellitenbildern die nichtparametrische Rektifizierung (6.4.2.2) an, da die Flugbahnen stabil und die Geländehöhenunterschiede im Verhältnis zur Flughöhe sehr klein sind. Die Vorkorrektur wird man in diesem Fall aber nach der Panoramakorrektur und der Korrektur der Erdrotation abbrechnen und den Einfluß der Erdkrümmung und der Projektionsverzerrungen des Landeskoordinatensystems z.B. mit Termen des Korrekturpolynomes erfassen.

Die auf diese Weise geometrisch korrigierten Satellitenbilder sind nur noch wegen der Geländehöhenunterschiede verfälscht. Diese Versetzungen in den Scannerbildern wurden in den Abschnitten 6.4.2.3g und 5.1.1 bereits behandelt. Die größten Versetzungen treten am Bildrand auf. Akzeptiert man eine Versetzung von einer halben Bildelementgröße  $\Delta Y$ , so ergeben sich aus folgender Formel die noch erlaubten Höhenunterschiede  $\Delta Z_{\max}$  innerhalb einer Bildszene:

$$\Delta Z_{\max} \leq \frac{\Delta Y}{2 \cdot \tan A} \quad (6.4-36)$$

Zahlenbeispiel: Beim TM von LANDSAT-4 und 5 beträgt  $\Delta Y = 30$  m und  $A = 8.2$  gon (4.2.3), d.h.  $\Delta Z_{\max} \leq 30 / (2 \cdot 0.13) = 115$  m. Die Schrägaufnahmen von SPOT (4.2.9) sind in dieser Hinsicht besonders anfällig. Beim P-Modus müssen die Höhenunterschiede bei maximaler Auslenkung der Blickrichtung ( $27^\circ$ ) kleiner sein als:  $\Delta Z_{\max} \leq 10 / (2 \cdot 0.51) = 9.8$  m.

Aufgabe 6.4-16: Für Scanneraufnahmen von LANDSAT-1, 2 und 3 (4.2.2) ist der erlaubte Höhenunterschied in einer Bildszene zu berechnen, wenn die Bildversetzungen kleiner als ein Drittel des Bildelementes bleiben sollen.



Als genaueste geometrische Rektifizierung mit Einbeziehung der Geländeform bietet sich auch für Satellitenaufnahmen die parametrische Rektifizierung (6.4.2.4) an. Dabei ist die Methode mit der Polynomapproximation der Flugbahn vorteilhafterweise zu verwenden: Auch für sehr lange Flugbahnen kommt man mit einem niedrigen Polynomgrad für die Approximation der Satellitenbahn aus. Die parametrische Rektifizierung baut auf den Formeln (6.4-21) auf, die im Objektraum ein dreidimensionales cartesisches Koordinatensystem unterstellen. Das Landeskoordinatensystem über große Bereiche - wie sie von Satellitenaufnahmen erfaßt werden - ist aber komplizierter aufgebaut (siehe auch Einleitung zum Abschnitt 5.1.5.2). Man muß daher entweder die mathematischen Formeln (6.4-21) entsprechend erweitern oder die geometrische Rektifizierung in einem an das Erdellipsoid angelegten Tangentialsystem - wie im Abschnitt 5.1.5.2 beschrieben - durchführen.

Falls man von den (nichtrektifizierten) Satelliten-Scannerdaten mit einem Filmschreiber (6.3.3) photographische Bilder erzeugt, kann man auch mit den analytischen Auswertegeräten (5.1.4.2) insbesondere kleinmaßstäbige topographische Karten herstellen und aktualisieren. Zu diesem Zweck ist die Software im Steuerrechner des analytischen Auswertegerätes so abzuwandeln, daß nicht mehr die im Abschnitt 5.1.4.1 formulierten Beziehungen den Zusammenhang zwischen den Landeskoordinaten und den Bildkoordinaten herstellen, sondern dabei der Geometrie der Scanneraufnahmen Rechnung getragen wird. Eine Lösungsvariante besteht zum Beispiel darin, daß man die Abbildungsgleichungen der Zentralprojektion beläßt und die Abweichungen der Scanneraufnahmen von der Zentralprojektion durch die Einführung einer "optischen Verzeichnung" berücksichtigt.

Literaturhinweise: Bähr (1985), Guban, Dowman (1988), Konecny et al. (1987).

#### 6.4.4 Rektifizierung von RADAR-Aufnahmen

RADAR-Aufnahmen (3.4.3) entstehen in nebeneinanderliegenden Zeilen, die senkrecht zur Flugrichtung angeordnet sind. Die Geometrie der RADAR-Aufnahmen in Flugrichtung entspricht daher den optischen Scanneraufnahmen (3.2). Innerhalb einer Zeile unterscheiden sich aber die RADAR- und optischen Scanneraufnahmen: Bei den optischen Scanneraufnahmen wird vom Projektionszentrum die Richtung zu den Geländepunkten registriert; bei den RADAR-Aufnahmen gibt es zwar auch ein Projektionszentrum, das Zentrum der Antenne, doch wird vom Projektionszentrum aus die Entfernung zu den Geländepunkten festgehalten.

Ein digital verarbeitetes RADAR-Bild - sei es von einem kohärenten System (3.4.3.2) oder von einem nichtkohärenten System (3.4.3.1) - wird in Flugrichtung mit einer Bildelementgröße  $\Delta x$  aufgebaut, die dem zeitlichen Abstand der ausgesandten RADAR-Impulse bzw. dem maßstäblich verkleinerten Abstand in X-Richtung der erfaßten Geländezeilen entspricht. (Die Bildelementgröße  $\Delta X$  (Gleichung (3.4-8) bzw. (3.4-13)) ist meist viel größer als der Zeilenabstand.  $\Delta X$  ist - bei nichtkohärentem RADAR - auch abhängig von der Schrägdistanz.) Die quer zur Flugrichtung verlaufenden y-Koordinaten sind die maßstäblich (Maßstabsfaktor m) verkleinerten Entfernungen R der Geländepunkte P vom Antennenzenralpunkt O (Bild 6.4-16).

Den bisher geschilderten Bildaufbau nennt man eine Schrägdistanzwiedergabe (slant range representation). Die erste Stufe der Entzerrung einer Radaraufnahme besteht im Übergang auf die sogenannte Grundrißwiedergabe (ground range representation). Die y'-Koordinate des Grundrißbildes erhält man aus folgender Beziehung (Bild 6.4-16):

$$y' = \frac{\sqrt{R^2 - H^2}}{m} \quad (6.4-37)$$

Falls die ideale Flugbahn, die im Bild 6.4-16 in X-Richtung angenommen wurde, exakt eingehalten wird und auch keine Verdrehungen der Plattform auftreten und schließlich das Gelände horizontal ist, ist die Grundrißwiedergabe  $y'$  eine geometrisch fehlerfreie Abbildung, also eine maßstäblich verkleinerte Abbildung der Erdoberfläche.

Falls geringe Abweichungen  $dX_0, dY_0, dZ_0$  von der idealen Flugbahn und kleine Neigungen  $d\omega, d\phi, dx$  der Plattform und schließlich kleine Höhenunterschiede  $dZ$  auftreten, ist der mathematische Zusammenhang zwischen den Bildkoordinaten  $(0, y')$  und den Landeskoordinaten  $(X, Y, Z)$  wie folgt:



tern ab:

- Kursabweichung  $dY_0$ , deren Auswirkungen im Abschnitt 6.4.2.3e veranschaulicht sind.
- Flughöhenänderung  $dZ_0$ , deren Einfluß durch Differentiation  $d(m \cdot y')/dH$  der etwas umgeformten Gleichung (6.4-37) gefunden wird.
- Geländehöhenunterschied  $dZ$ , deren Einfluß einer Flughöhenänderung
  - allerdings mit umgekehrten Vorzeichen - entspricht.

Zahlenbeispiel: Eine RADAR-Aufnahme in einer Höhe  $H = 1000$  m liefert für die Punkte P und Q folgende Entfernungen:  $R_P = 2000$  m und  $R_Q = 1500$  m. Man berechne für einen Bildmaßstab  $1:m = 1:2500$  die Grundrißwiedergabe (6.4-37):

$$y'_P = \sqrt{2000^2 - 1000^2} / 2500 = 0.69282 \text{ m}$$

$$y'_Q = \sqrt{1500^2 - 1000^2} / 2500 = 0.44721 \text{ m}$$

Wie groß ist die Bildversetzung im Punkt P, wenn dort ein Höhenunterschied von 25 m gegenüber der Referenzebene auftritt? Lösung:

$$(6.4-39): Y - m \cdot y' = \overline{P'(P)} = 1000 \cdot 25 / (2500 \cdot 0.69282) = 14.43 \text{ m}$$

im Bild:  $14.43 / 2500 = 0.00577 \text{ m} \hat{=} 5.77 \text{ mm}$

Wie groß ist die Bildversetzung im Punkt P nicht in der Grundrißwiedergabe, sondern in der Schrägdistanzwiedergabe, wenn dort ein Höhenunterschied von 25 m gegenüber der Referenzebene auftritt? Lösung:

$$\overline{P''(P)} = \frac{H}{R} dZ = \frac{H}{m \cdot y} dZ = 1000 \cdot 25 / 2000 = 12.5 \text{ m} \quad (6.4-40)$$

im Bild:  $12.5 / 2500 = 0.005 \text{ m} \hat{=} 5 \text{ mm}$

Hinsichtlich der Bildversetzungen infolge von Höhenunterschieden lassen sich aus den bisherigen Ausführungen folgende Feststellungen machen:

- Diese Bildversetzungen verlaufen senkrecht zur Flugrichtung; dabei sind die Bildpunkte mit zunehmender Geländehöhe in Richtung zum Antennenzen-tralpunkt O versetzt. Bei den Aufnahmen mit Rotationsabtastern (3.2.1) und mit digitalen Zeilenkameras (3.2.2) sind die Bildpunkte dagegen weg vom Projektionszentrum versetzt (6.4.2.3g).
- Im RADAR-Bild sind die Bildversetzungen umso größer, je steiler die Blickrichtung (also je größer der Depressionswinkel  $\beta$  (siehe 3.4.3.1)) ist. Bei den optischen Scanneraufnahmen und bei der Photographie ist es umgekehrt (Gleichung (5.1-2)).
- Im RADAR-Bild verringern sich die Bildversetzungen mit der y-Koordinate, das heißt sie nehmen vom inneren zum äußeren Bildrand ab. Bei den optischen Scanneraufnahmen treten dagegen in der Mittellinie keine Ver-setzungen auf; sie wachsen mit der y-Koordinate und sind am Bildrand am



größten (6.4.2.3g und Gleichung (5.1-2)).

- In der Grundrißwiedergabe, die eigentlich die erste Stufe einer Entzerrung ist, sind die Bildversetzungen größer als in der Schrägdistanzwiedergabe (vergleiche die Formeln (6.4-39) und (6.4-40)).

Die eigentliche Rektifizierung von RADAR-Aufnahmen soll im folgenden nur angedeutet werden. Sofern die Bildversetzungen infolge von Höhenunterschieden klein sind, wandelt man die Schrägentfernungen in Grundrißentfernungen mittels der Gleichung (6.4-37) um und führt eine nichtparametrische Rektifizierung (6.4.2.2) durch.

Bereits bei geringen Höhenunterschieden gibt es beachtliche Bildversetzungen. Mit der nichtparametrischen Rektifizierung muß deshalb eine Korrektur der von den Höhenunterschieden verursachten Bildversetzungen einhergehen. Zu diesem Zweck ist ein digitales Geländemodell (5.1.4.4) unerlässlich. Unter anderem hat dafür Rauste (1988) eine Lösung angegeben.

Bei RADAR-Aufnahmen spielt die aufwendige parametrische Rektifizierung eine große Rolle. Sie kann im Prinzip nach dem im Abschnitt 6.4.2.4 besprochenen Methoden durchgeführt werden. Dafür sind die dort angegebenen mathematischen Formeln allerdings etwas abzuwandeln, und zwar in der Weise, wie sich die Gleichung (6.4-39) von der zweiten Gleichung des Gleichungssystems (6.4-19) unterscheidet.

Bei einer genauen Rektifizierung von RADAR-Aufnahmen ist auch die "Zeilen-schiefe" zu beachten. Ohne auf die Hintergründe dieses Phänomens näher einzugehen, sei hier nur angemerkt, daß man sich die RADAR-Impuls-Ausbreitung in vielen Fällen nicht genau in einer Ebene senkrecht zur Flugachse, sondern in einer Kegelfläche mit der Spitze im Antennenzentrum vorzustellen hat. (Meier, Nüesch (1986) und die dort angegebene Literatur).

Aufgabe 6.4-16: Man wiederhole das Zahlenbeispiel mit einer Flughöhe von 1200 m. Die übrigen Angaben, also auch die Entfernungen  $R_p$  und  $R_Q$ , sollen gleich bleiben.

Aufgabe 6.4-17: Wie groß ist die Verkürzung (foreshortening) des Hanges  $\overline{QP}$  bei der RADAR-Aufnahme des Zahlenbeispieles? Wie groß ist die Vergrößerung des Hanges  $QP$  bei einer Aufnahme mit einer digitalen Zeilenkamera vom gleichen Aufnahmestandpunkt aus?

Aufgabe 6.4-18: Wie groß dürfen die Höhenunterschiede sein, damit im RADAR-Bild des Zahlenbeispieles keine größeren Bildversetzungen als 1 mm auftreten?

Zusätzliche Literatur: Curlander et al. (1987), Buchroithner (1989), Domik et al. (1984), Leberl (1983).

### 6.5 Radiometrische Rektifizierung optischer Bilddaten.

Eine optische Fernerkundungsaufnahme stellt näherungsweise die Verteilung der Strahldichte  $L$  der von der Geländeoberfläche ausgehenden, zum Sensor gerichteten Strahlung dar. Im Falle reflektierter Strahlung ist diese Strahldichte ein Maß für den Reflexionsgrad, im Falle emittierter Strahlung ein Maß für die Temperatur der Geländeoberfläche. Die digitalen Bildelementwerte  $g$  sind im allgemeinen jedoch nicht direkt proportional zur Strahldichte  $L$ , zum Reflexionsgrad  $\rho$  bzw. zur Temperatur  $T$  des zugehörigen Geländeoberflächenelementes. Die Bildelementwerte sind vielmehr durch verschiedenste Störeinflüsse verfälscht. Man spricht - in Analogie zu den geometrischen Verzerrungen eines Fernerkundungsbildes - von radiometrischen Verzerrungen. Ziel der absoluten radiometrischen Rektifizierung ist die rechnerische Eliminierung der radiometrischen Verzerrungen, sodaß jeder Bildelementwert  $g$  direkt proportional zur Strahldichte  $L$ , zum gerichteten Reflexionsgrad  $\rho_r$  (für normierte Einstrahlungsbedingungen und für lotrechte Reflexionsrichtung) oder zur Oberflächentemperatur  $T$  ist.

Zwei Fernerkundungsbilder können auch relativ zueinander radiometrisch rektifiziert werden, sodaß die radiometrischen Verzerrungen zwar nicht eliminiert, aber in beiden Bildern identisch werden. Radiometrisch rektifizierte Fernerkundungsbilder können in jedem Fall Bildelement für Bildelement unmittelbar miteinander quantitativ verglichen werden, auch wenn sie unter verschiedenen Aufnahmebedingungen gewonnen worden sind.

Die Ursachen für radiometrische Verzerrungen sind vielfältig und liegen vor allem in wechselndem Sonnenstand, Geländeunebenheiten, richtungsabhängiger Reflexion oder Emission der Geländeoberfläche, Absorption und Streuung in der Atmosphäre, richtungsabhängigem Transmissionsgrad der Sensoroptik sowie variierender und nichtlinearer Detektorempfindlichkeit. Dementsprechend kompliziert ist die radiometrische Rektifizierung, die in der Praxis immer nur näherungsweise durchgeführt werden kann.

In diesem Kapitel werden einige einfache, aber für die praktische Anwendung wichtige Verfahren der radiometrischen Rektifizierung unter Berücksichtigung von atmosphärischen Einflüssen, Blickrichtungseffekten, Detektor-(Film-)Nichtlinearitäten und breiten spektralen Empfindlichkeitsbereichen der Detektoren besprochen. (Die Elimination der geländeformabhängigen Strahlungseffekte wird im Abschnitt 6.8.6 kurz angesprochen.)

### 6.5.1 Korrektur atmosphärischer Einflüsse

Ein Fernerkundungssensor nehme ebenes Gelände mit Lambertscher Oberflächencharakteristik in mehreren Spektralkanälen im Wellenlängenbereich optischer reflektierter Strahlung auf. Der Detektor (die Detektoren) des Sensors möge(n) ein der Detektor-Bestrahlungsstärke  $E$  proportionales Signal liefern. Bei Vernachlässigung von Blickrichtungseffekten kann der Zusammenhang zwischen einem Bildelementwert  $g_k$  im Spektralkanal  $k$  und der Strahldichte  $L_{Gk}$  bzw. dem Reflexionsgrad  $\rho_k$  des zugehörigen Bodenoberflächenelementes in Anlehnung an (2.7-15) wie folgt geschrieben werden:

$$\begin{aligned} g_k &= R_k \hat{\Phi}_k + A_k = R_k G_k \pi \cdot L_k + A_k = R_k G_k (\pi \cdot L_{Gk} \tau_{Ak} + \pi \cdot L_{Lk}) + A_k = \\ &= R_k G_k (E_{Gk} \rho_k \tau_{Ak} + \pi \cdot L_{Lk}) + A_k \end{aligned} \quad (6.5-1)$$

$R_k$  und  $A_k$   $\hat{=}$  Parameter zur Beschreibung eines linearen Zusammenhanges zwischen dem auf den Detektor auffallenden Strahlungsfluß  $\hat{\Phi}_k$  und dem resultierenden Bildelementwert  $g_k$ .  $R_k$  hat die Dimension  $W^{-1}$ ,  $A_k$  ist eine vom Strahlungsfluß  $\hat{\Phi}_k$  unabhängige dimensionslose Konstante.

$G_k$   $\hat{=}$  Faktor, der die strahlungssammelnde Wirkung der Sensoroptik beschreibt. Er gibt den Zusammenhang zwischen der spezifischen Ausstrahlung  $M_k$  der angepeilten Fläche und dem auf den Detektor auffallenden Strahlungsfluß  $\hat{\Phi}_k$  an. Seine Dimension ist  $m^2$ . Für den Abtaster gilt z.B. (vergleiche 3.2-29)):

$$G_k = d_0^2 (\Delta \alpha)^2 \tau_0 / 4 \quad (6.5-2)$$

$L_k$   $\hat{=}$  die gesamte vom Sensor erfaßte Strahldichte im Kanal  $k$ .

$L_{Gk}$   $\hat{=}$  die von der Geländeoberfläche ausgehende Strahldichte.

$\tau_{Ak}$   $\hat{=}$  der Transmissionsgrad der Atmosphäre von der Geländeoberfläche bis zum Sensor.

$L_{Lk}$   $\hat{=}$  die Luftlicht-Strahldichte.

$E_{Gk}$   $\hat{=}$  die Bestrahlungsstärke des Geländes durch Globalstrahlung.

Die Beziehung (6.5-1) zeigt, daß ein Bildelementwert  $g_k$  die interessierende Größe  $\rho_k$  (oder  $L_{Gk}$ ) nicht direkt, sondern durch einen multiplikativen Faktor  $m_k$  und einen additiven Term  $a_k$  "verzerrt" angibt:

$$g_k = m_k \rho_k + a_k \quad (6.5-3)$$

wobei

$$m_k = R_k G_k E_{Gk} \tau_{Ak} \quad (6.5-4)$$

$$a_k = \pi R_k G_k L_{Lk} + A_k \quad (6.5-5)$$

Eine absolute radiometrische Rektifizierung kann am einfachsten dann durchgeführt werden, wenn Probeflächen bekannten, d.h. terrestrisch gemessenen

Reflexionsvermögens in einem Fernerkundungsbild vorhanden sind. In jedem Spektralkanal  $k$  sollen jeweils sowohl Probeflächen möglichst hohen als auch solche möglichst niedrigen Reflexionsgrades vorliegen. Es seien die Daten von zwei Probeflächen gegeben: Die Bildelementwerte dieser Probeflächen seien  $g_k^1$  und  $g_k^2$ , der jeweils zugehörige Reflexionsgrad sei terrestrisch als  $\rho_k^1$  und  $\rho_k^2$  erhalten worden. Die gesuchten Größen  $m_k$  und  $a_k$  können dann aus den zwei linearen Gleichungen (6.5-3) folgendermaßen ermittelt werden:

$$m_k = \frac{g_k^1 - g_k^2}{\rho_k^1 - \rho_k^2} \quad a_k = \frac{\rho_k^1 g_k^2 - \rho_k^2 g_k^1}{\rho_k^1 - \rho_k^2} \quad (6.5-6)$$

Bei mehr als zwei Probeflächen sind die Werte  $m_k$  und  $a_k$  durch lineare Regression (Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate; siehe Anhang 6.4-1) zu bestimmen.

Beispiel: Auf einer LANDSAT-TM-Szene werden eine Wasserfläche, eine Wiese sowie ein frisch gepflügter Acker als Referenzflächen ausgewählt. In den sechs reflektierten Spektralkanälen werden folgende terrestrische Meßwerte  $\rho_k$  und LANDSAT-Bildelementwerte  $g_k$  ermittelt:

	Kanal 1	Kanal 2	Kanal 3	Kanal 4	Kanal 5	Kanal 7
Wasser	$\rho_k$	4.5%	5.5%	6.0%	2.3%	0%
	$g_k$	69	30	23	14	2
Wiese	$\rho_k$	4.0%	7.5%	4.5%	44%	25%
	$g_k$	72	33	23	99	60
Acker	$\rho_k$	11%	15%	21%	26%	41%
	$g_k$	91	41	49	60	94

Die Bestimmung der Koeffizienten  $m_k$  und  $a_k$  mit Hilfe der Gleichungen (6.5-6) ergibt folgende Werte, wobei aus den drei verfügbaren Wertepaaren jeweils die beiden Extremwerte benützt werden:

$m_k$	338	116	158	204	224	211
$a_k$	54	24	16	9.3	2.0	2.0

Mit Hilfe der linearen Regression, in die alle drei Wertepaare eingehen, erhält man folgende Koeffizienten  $m_k$  und  $a_k$ :



$m_k$	300.0	113.3	164.0	203.3	225.1	212.1
$a_k$	57.8	24.1	14.4	8.7	2.5	1.0

Die Koeffizienten  $m_k$  und  $a_k$  für die absolute radiometrische Rektifizierung können gemäß (6.5-4) und (6.5-5) auch aus den Sensor-Kalibrierungsdaten  $R_k$ ,  $G_k$  und  $A_k$ , der Globalstrahlungsstärke  $E_{Gk}$  und den Atmosphären-Kenngrößen  $\tau_{Ak}$  und  $L_{Lk}$  bestimmt werden:  $R_k$ ,  $G_k$  und  $A_k$  werden meist vom Sensor-Hersteller bzw. -Betreiber angegeben. So werden z.B. mit LANDSAT-TM-Bilddaten für jeden Spektralkanal  $k$  die radiometrischen Kalibrierungsgrößen  $c_{0k}$  ("offset") und  $c_{1k}$  ("gain"), mitgeliefert, welche die vom Sensor erfaßte Strahldichte  $L_k$  mit dem jeweils registrierten Bildelementwert  $g_k$  verknüpfen:

$$L_k = c_{0k} + c_{1k} \cdot g_k \quad (6.5-7)$$

Durch Vergleich mit (6.5-1) folgt:

$$R_k G_k = \frac{1}{\pi \cdot c_{1k}}, \quad A_k = - \frac{c_{0k}}{c_{1k}} \quad (6.5-8)$$

Die restlichen für die Ermittlung von  $m_k$  und  $a_k$  benötigten Größen,  $E_{Gk}$ ,  $\tau_{Ak}$  und  $L_{Lk}$ , können durch terrestrische radiometrische Messungen (Kapitel 3.5) sowie unter Verwendung von Atmosphärenmodellen (Kapitel 2.7) bestimmt werden:  $E_{Gk}$  kann z.B. direkt gemessen werden und  $\tau_{Ak}$  ist gemäß (2.7-9) mit  $\tau_{ext}(\lambda, 0)$  aus (3.5-6) zu ermitteln.  $L_{Lk}$  muß indirekt mit einem Atmosphärenmodell berechnet werden.

Die Größe  $a_k$  kann aber meist auch aus dem Fernerkundungsbild selbst ohne jede Zusatzinformation abgeschätzt werden: Nimmt man an, daß in jedem Fernerkundungsbild Geländebereiche abgebildet sind, die in gewissen Spektralkanälen einen vernachlässigbar kleinen Reflexionsgrad haben (im Spektralbereich sichtbaren Lichtes: z.B. Vegetationsflächen oder feuchter, humusreicher Ackerboden im Schatten; im Infrarotbereich: tiefe, klare Gewässer), so kann der kleinste im Bild vorkommende Bildelementwert als Schätzwert für  $a_k$  genommen werden. Wenn auf diese Weise  $a_k$  vorliegt, kann mit Hilfe der Beziehung (6.5-5) aus Satellitenaufnahmen die schwer zugängliche Strahldichte des Luftlichtes,  $L_{Lk}$ , abgeschätzt werden.

Fortsetzung des Beispiels: Simultan zur Aufnahme der LANDSAT-TM-Szene wurden terrestrische radiometrische Messungen durchgeführt, sodaß die spektrale Bestrahlungsstärke durch Globalstrahlung,  $E_{G\lambda}$ , und der spektrale Transmissionsgrad der Atmosphäre für lotrechte Strahlrichtung,  $\tau_A(\lambda)$ , bekannt sind. Darüber hinaus sind die Kalibrierungsgrößen  $c_{0k}$  ("offset") und  $c_{1k}$  ("gain") der TM-Kanäle (Tab. 4.2-14) gegeben. Die kleinsten

Bildelementwerte  $g_{k,min}$  werden aus der TM-Szene selbst ermittelt.

	Kanal 1 $\lambda=0.5\mu m$	Kanal 2 $\lambda=0.55\mu m$	Kanal 3 $\lambda=0.65\mu m$	Kanal 4 $\lambda=0.8\mu m$	Kanal 5 $\lambda=1.65\mu m$	Kanal 7 $\lambda=2.2\mu m$
$E_{G\lambda}[W \cdot m^{-2} \mu m^{-1}]$	998	921	841	666	121	47
$\tau_A(\lambda)$	0.657	0.677	0.719	0.795	0.830	0.840
$c_{0k}[W \cdot m^{-2} sr^{-1}]$	0.0666	-0.1573	-0.1127	-0.2329	-0.0864	-0.0511
$c_{1k}[W \cdot m^{-2} sr^{-1}]$	0.0420	0.1035	0.0650	0.1171	0.0273	0.0169
$g_{k,min}$	56	20	14	10	2	1

Man berechne die Koeffizienten  $m_k$  und  $a_k$  aus diesen Angaben und vergleiche sie mit der oben erhaltenen Lösung. Man schätze zusätzlich die spektrale Strahldichte des Luftlichtes,  $L_{L\lambda}$ , in den einzelnen TM-Kanälen ab.

**Lösung:** Die Werte der integralen Bestrahlungsstärke für jeden TM-Kanal,  $E_{Gk}$ , sind aus den für die mittlere Wellenlänge jedes Kanales angegebenen Werten der spektralen Bestrahlungsstärke  $E_{G\lambda}$  durch Multiplikation mit der Breite der Spektralkanäle zu ermitteln:

$$(2.3-15) \\ E_{Gk} = E_{G\lambda} \cdot \Delta\lambda_k$$

In Ermangelung exakter Werte für  $\Delta\lambda_k$  werden hier einfach die Intervalle aus Tab. 4.2-14 genommen, also  $\Delta\lambda_1 = 0.07 \mu m$ ,  $\Delta\lambda_2 = 0.08 \mu m$ ,  $\Delta\lambda_3 = 0.06 \mu m$ ,  $\Delta\lambda_4 = 0.14 \mu m$ ,  $\Delta\lambda_5 = 0.20 \mu m$  und  $\Delta\lambda_7 = 0.27 \mu m$ . Durch Anwendung der Gleichungen (6.5-8), (6.5-4) und (6.5-5) sowie unter Beachtung von  $L_{Lk} = L_{L\lambda} \cdot \Delta\lambda_k$  erhält man:

	Kanal 1	Kanal 2	Kanal 3	Kanal 4	Kanal 5	Kanal 7
(6.5-8): $R_k G_k [W^{-1} m^2]$	7.58	3.08	4.90	2.72	11.66	18.83
(6.5-8): $A_k$	-1.59	1.52	1.73	1.99	3.16	3.02
$E_{Gk}[W \cdot m^{-2}] = E_{G\lambda} \cdot \Delta\lambda_k$	69.86	73.68	50.46	93.24	24.20	12.69
(6.5-4): $m_k$	347.9	153.6	177.8	201.6	234.2	200.7
$a_k = g_{k,min}$	56	20	14	10	2	1
(6.5-5): $L_{Lk}[W \cdot m^{-2} sr^{-1}]$	2.42	1.91	0.797	0.937	0*)	0*)
$L_{L\lambda}[W \cdot m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}] = L_{Lk} / \Delta\lambda_k$	34.6	23.9	13.3	6.70	0*)	0*)

\*) Hier ergeben sich, bedingt durch zufällige Meßfehler, negative Werte, die gleich Null gesetzt werden.

Soll ein Fernerkundungsbild radiometrisch so rektifiziert werden, daß der Bildelement-Wertebereich 0-255 den Reflexionsgrad-Wertebereich 0- $\rho_{max}$  repräsentiert, so ist folgende lineare Transformation auszuführen:

$$g_{k,rekt} = \frac{255}{\rho_{max}} \cdot \frac{g_k - a_k}{m_k} \quad (6.5-9)$$

**Fortsetzung des Beispiels:** Man berechne die Bildelementwerte der Probeflächen in dem auf der Grundlage der terrestrischen Reflexionsgradmeßwerte radiometrisch rektifizierten Bild für  $\rho_{max} = 0.5$ :

	Kanal 1	Kanal 2	Kanal 3	Kanal 4	Kanal 5	Kanal 7
Wasser	19	27	27	13	0	2
Wiese	24	40	27	227	130	67
Acker	56	76	108	129	207	185

Wir wollen nun noch das Problem behandeln, daß ein Fernerkundungsbild A mit den Bildelementwerten  $g_k^A$  relativ zu einem Fernerkundungsbild B mit den Bildelementwerten  $g_k^B$  radiometrisch zu rektifizieren ist. Nach Ausführung der Transformation

$$g_k^{A'} = m_k' \cdot g_k^A + a_k' \quad (6.5-10a)$$

soll das Bild A' dieselben radiometrischen Verzerrungen wie das Bild B aufweisen, sodaß A' und B Bildelement für Bildelement quantitativ miteinander verglichen werden können. Die Transformationsparameter  $m_k'$  und  $a_k'$  sind aus Bildelementwertepaaren identischer Probeflächen auf den Bildern A und B zu ermitteln. Für diese Probeflächen muß gelten:

$$g_k^B = m_k' \cdot g_k^A + a_k' \quad (6.5-10b)$$

Aus zwei Bildelementwertepaaren können die Parameter  $m_k'$  und  $a_k'$  mit Beziehungen analog zu (6.5-6) berechnet werden. In der Praxis wird man mehr als zwei Bildelementwertepaare benutzen und die Parameter  $m_k'$  und  $a_k'$  mittels linearer Regression bestimmen. Bei Fernerkundungsbildern unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte sind Probeflächen zu wählen, von denen man annehmen kann, daß sich ihr Reflexionsgrad zwischen den Aufnahmezeitpunkten nicht verändert hat (Vorsicht z.B. bei jahreszeitlichen Änderungen der Vegetation!). Bezeichnet man die Parameter der absoluten radiometrischen Rektifizierung (Gleichung (6.5-3)) des Bildes A mit  $m_k^A, a_k^A$  und jene des Bildes B mit  $m_k^B, a_k^B$ , so ergibt sich aus (6.5-3) und (6.5-10b) folgender Zusammenhang mit den Parametern der relativen radiometrischen Kalibrierung:

$$m_k' = \frac{m_k^B}{m_k^A}, \quad a_k' = \frac{m_k^A a_k^B - m_k^B a_k^A}{m_k^A} \quad (6.5-11)$$

## 6.5.2 Korrektur von Blickrichtungseffekten

Bei der Aufnahme eines Fernerkundungsbildes "sieht" der Sensor die einzelnen Teile des Geländes aus verschiedenen Blickrichtungen. Diese Blickrichtungseffekte sind bei Satellitenaufnahmen meist zu vernachlässigen, bei Aufnahmen aus dem Flugzeug jedoch oft sehr ausgeprägt. Charakterisieren wir

die Blickrichtung durch den Zenitwinkel  $\theta$  ( $\hat{=}$  Bildwinkel  $\alpha$ ) und das Azimut  $\phi$ , so ist bei Abtasteraufnahmen das Azimut für einen gesamten aufgenommenen Geländestreifen konstant, während der Zenitwinkel entsprechend dem Abstand eines Geländepunktes von der Nadirlinie des Streifens variiert. Es ist also eine eindimensionale Mannigfaltigkeit von Blickrichtungen gegeben, d.h. die auf einem Bild vorkommenden Blickrichtungen sind durch die Angabe eines einzigen Parameters, des Zenitwinkels  $\theta$ , eindeutig bestimmt. Alle entlang einer Linie mit konstantem Abstand von der Streifenmitte liegenden Bildelemente sind unter konstanter Blickrichtung aufgenommen.

Bei Flächensensor-Aufnahmen (z.B. mit einer photographischen Kamera) stellen die Blickrichtungen eine zweidimensionale Mannigfaltigkeit dar: Neben dem Zenitwinkel  $\theta$  ( $\hat{=}$  Bildwinkel  $\alpha$ ) ist zur Bezeichnung einer Blickrichtung auch das Azimut  $\phi$  anzugeben. Die Blickrichtung ist für jedes Bildelement unterschiedlich.

Aus Bild 6.5-1 kann man die folgenden Beziehungen ablesen, wobei wir allfällige Abweichungen von der exakt senkrechten Aufnahmerichtung vernachlässigen: Für den Abtaster (Zeilenkamera, aber auch Rotationsabtaster nach durchgeführter Panoramakorrektur; siehe 6.4.2.1) gilt:

$$\theta = \arctan \frac{y}{c} \quad \phi = \text{const} \quad (6.5-12)$$

Für Flächensensoren erhält man:

$$\theta = \arctan \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{c^2}} \quad \phi = \arctan \frac{y}{x} \quad (6.5-13)$$

$x$  und  $y$  sind hier die Bildkoordinaten, deren Ursprung in der Streifenmitte bzw. Bildmitte liegt.  $c$  ist die Kammerkonstante (Bedeutung beim Rotationsabtaster: siehe Abschnitt 6.4.2.1). Der Winkel  $\theta$  ergibt sich aus (6.5-12), je nach dem Vorzeichen von  $y$ , positiv oder negativ.  $\phi$  ist aus (6.5-13) entsprechend dem Vorzeichen von  $x$  und  $y$  quadrantenrichtig zu bestimmen.



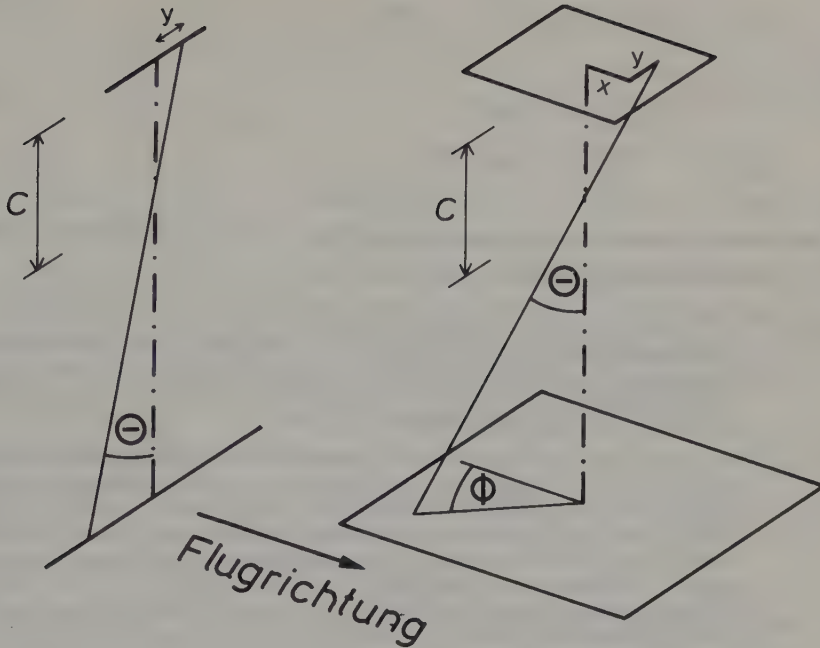


Bild 6.5-1: Zur Beschreibung der Blickrichtung bei Abtaster-Aufnahmen und bei Flächensensor-Aufnahmen

Mit (6.5-12) und (6.5-13) ist die Beziehung zwischen den Koordinaten eines Bildelementes und der zugehörigen Blickrichtung  $\theta, \phi$  hergestellt. Im folgenden werden die Gleichungen teilweise nur mit den Blickrichtungsvariablen  $\theta, \phi$  angeschrieben. Bei Bedarf ist der Übergang zu den Bildkoordinaten mit (6.5-12) bzw. (6.5-13) durchzuführen.

Wir beschränken uns so wie im Abschnitt 6.5.1 auf ebenes Gelände und setzen einen linearen Detektor voraus, lassen jedoch eine nicht-Lambertsche Oberflächencharakteristik zu und berücksichtigen Blickrichtungsabhängigkeiten der atmosphärischen Transmission, des Luftlichts und des Transmissionsgrades der Sensoroptik. Gleichung (6.5-1) wird damit zu:

$$g_k(\theta, \phi) = R_k G_k(\theta) [E_{Gk} \cdot \rho_{rk}(\theta, \phi) \cdot \tau_{Ak}(\theta) + \pi \cdot L_{Lk}(\theta, \phi)] + A_k \quad (6.5-14)$$

$\rho_{rk}(\theta, \phi)$  ist hier der gerichtete Reflexionsgrad im Kanal  $k$  für die Richtung  $\theta, \phi$ . In Analogie zu (6.5-3) bis (6.5-5) erhält man:

$$g_k(\theta, \phi) = m_k(\theta) \cdot \rho_{rk}(\theta, \phi) + a_k(\theta, \phi) \quad (6.5-15)$$

wobei:

$$m_k(\theta) = R_k G_k(\theta) \cdot E_{Gk} \cdot \tau_{Ak}(\theta) \quad (6.5-16)$$

$$a_k(\theta, \phi) = \pi \cdot R_k G_k(\theta) \cdot L_{Lk}(\theta, \phi) + A_k \quad (6.5-17)$$

Man kann zwei Stufen der radiometrischen Rektifizierung mit Berücksichtigung von Blickrichtungseffekten unterscheiden:

Stufe 1: Es werden nur die atmosphärischen und die sensorbedingten Blickrichtungseffekte kompensiert. Im radiometrisch rektifizierten Bild stellt jedes Bildelement den gerichteten Reflexionsgrad der betreffenden Stelle der Geländeoberfläche für die jeweils tatsächlich vorliegende Richtung  $\theta, \phi$  dar.

Stufe 2: Es wird zusätzlich auch die Richtungsabhängigkeit des Reflexionsgrades berücksichtigt und kompensiert. Im radiometrisch rektifizierten Bild stellt dann jedes Bildelement den gerichteten Reflexionsgrad für die Zenitrichtung ( $\theta=0$ ) dar, auch wenn das betreffende Bildelement bei der Aufnahme unter einer beliebigen anderen Richtung  $\theta, \phi$  vom Sensor erfaßt worden ist. Dazu muß die Richtungsabhängigkeit des Reflexionsgrades bekannt sein, die jedoch objektspezifisch ist. Eine Blickrichtungskorrektur der Stufe 2 ist daher jeweils nur für eine bestimmte Objektklasse durchführbar.

Eine absolute radiometrische Rektifizierung mit Korrektur der Blickrichtungseffekte nach Stufe 1 ist im Prinzip einfach, wenn eine hinreichende Anzahl von Probeflächen bekannt ist, in denen terrestrisch gerichtete Reflexionsgrade gemessen wurden. Diese Probeflächen müssen über das ganze Bildformat verteilt, d.h. für möglichst viele Blickrichtungen gegeben sein. Es muß jeweils der gerichtete Reflexionsgrad für die Richtung  $\theta, \phi$  zum Sensor bekannt sein. So wie im Abschnitt 6.5.1 gefordert, müssen in jedem Spektralkanal  $k$  sowohl Probeflächen möglichst hohen als auch solche möglichst niedrigen Reflexionsgrades vorliegen. Man kann dann Polynome für  $m_k(\theta)$  und  $a_k(\theta, \phi)$  ansetzen und die Koeffizienten dieser Polynome aus den gegebenen Daten - aus dem Reflexionsgrad  $\rho_{rk}$  und Bildelementwert  $g_k$  der Probeflächen - durch Regressionsanalyse (Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate; siehe Anhang 6.4-1) ermitteln. Die Polynome setzt man anstatt mit den Blickrichtungsvariablen  $\theta, \phi$  unmittelbar mit den Bildkoordinaten  $x, y$  an. Für den Abtaster mit  $\phi = \phi_0 = \text{const}$  und einem Zenitwinkel  $\theta$ , der gemäß (6.5-12) nur von  $y$  abhängt, lautet ein sinnvoller Polynomansatz

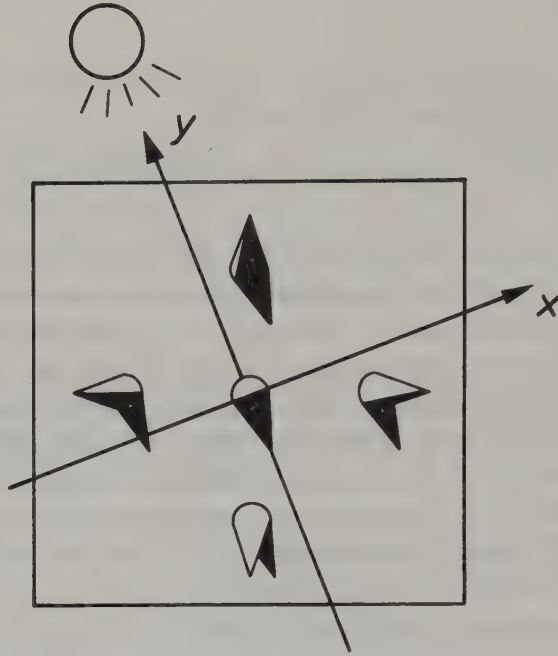
z.B.:

$$\begin{aligned} m_k(y) &= m_{0k} + m_{2k}y^2 + m_{4k}y^4 \\ a_k(y) &= a_{0k} + a_{1k}y + a_{2k}y^2 + a_{3k}y^3 + a_{4k}y^4 \end{aligned} \quad (6.5-18)$$

Hier ist für  $m_k$  eine in  $y$  gerade (um die Flugstreifenmitte symmetrische) Funktion angenommen, da der Transmissionsgrad sowohl der Atmosphäre als auch der Sensoroptik nur von der Größe von  $y$ , nicht aber von dessen Vorzeichen abhängen sollte. (Allerdings wird bei schlecht justierten Rotationsab-tastern bisweilen eine Richtungsabhängigkeit von  $R_k$  (Gleichung 6.5-16) beobachtet, die nur durch zusätzliche ungerade Glieder im Polynomansatz für  $m_k(y)$  in Gleichung (6.5-18) zu beschreiben wäre.) Die Funktion  $a_k(y)$  ist im allgemeinen Fall, d.h. bei einem Sonneneinfalls-Azimet, das nicht genau senkrecht zur Abtastzeilenrichtung liegt, nicht um die Flugstreifenmitte symmetrisch, da die Luftlicht-Strahldichte  $L_{Lk}$  in Gleichung (6.5-17) vom Winkel zur Sonneneinfallsrichtung abhängt.

Beim Flächensensor haben wir, wie schon erwähnt, eine zweidimensionale Man-nigfaltigkeit von Blickrichtungen, sodaß  $m_k$  und  $a_k$  Funktionen beider Bild-koordinaten  $x, y$  sind. Wählen wir ein Bildkoordinatensystem mit einer zur Sonneneinfallsrichtung parallelen  $y$ -Achse (Bild 6.5-2), so kann  $a_k(x, y)$  als eine in  $x$  gerade Funktion angenommen werden. Ein sinnvoller Polynomansatz lautet dann z.B.:

$$\begin{aligned} m_k(x, y) &= m_{0k} + m_{2k}(x^2 + y^2) + m_{4k}(x^2 + y^2)^2 \\ a_k(x, y) &= a_{00k} + a_{01k}y + a_{20k}x^2 + a_{02k}y^2 + a_{21k}x^2y + \dots \end{aligned} \quad (6.5-19)$$



*Bild 6.5-2: Bildkoordinatensystem für die Berücksichtigung von Blickrichtungseffekten bei Flächensensoren*

Man sieht, daß die Ansätze (6.5-18) bzw. (6.5-19) je nach Grad der gewählten Polynome eine relativ große Anzahl von Koeffizienten enthalten, zu deren Bestimmung mittels Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate eine verhältnismäßig große Anzahl von terrestrisch beobachteten Probeflächen von geeignetem Reflexionsgrad und geeigneter räumlicher Verteilung benötigt werden. In der Praxis ist es meist schwierig, eine entsprechende Anzahl passender Probeflächen zu finden und ihren gerichteten Reflexionsgrad für die jeweilige Blickrichtung möglichst simultan mit der Fernerkundungsaufnahme zu messen. Da die Blickrichtung zum Sensor im Zeitpunkt der terrestrischen Messung oft noch gar nicht bekannt ist, muß die Strahldichte der reflektierten Strahlung dabei oft für mehrere Richtungen gemessen werden, um den gerichteten Reflexionsgrad für die benötigte Richtung daraus später durch Interpolation ermitteln zu können.

Die Anzahl der Unbekannten in den radiometrischen Rektifizierungsfunktionen  $m_k(\theta)$  und  $a_k(\theta, \phi)$  kann verringert werden, wenn man auf deren physikalische Bedeutung (Gleichungen (6.5-16) und (6.5-17)) zurückgreift und Sensor-Kalibrierungsdaten sowie terrestrisch gemessene Atmosphärenparameter einsetzt. Wir betrachten als Beispiel eine Kamera (digitale Zeilenkamera oder nicht-



photographischer Flächensensor), für deren Objektiv gemäß Abschnitt 3.1.1.3' (Gleichung (3.1-13) und folgende Erörterungen) ein Bestrahlungsstärkeabfall proportional zu  $\cos^n \theta$  ( $n$  liegt zwischen 2 und 3) angenommen werden kann:

$$G_k(\theta) = G_k(0) \cdot \cos^n \theta \quad (6.5-20)$$

Unter Berücksichtigung von (2.7-14) erhalten wir aus (6.5-16):

$$m_k(\theta) = R_k G_k(0) \cdot \cos^n \theta \cdot E_{Gk} \cdot (\tau_{Ak}(0)) \frac{1}{\cos \theta} \quad (6.5-21)$$

Die Parameter  $R_k$ ,  $G_k(0)$  (oder das Produkt dieser Größen) sowie  $n$  sind Sensorkenngrößen und können, soweit sie nicht vom Hersteller angegeben werden, durch radiometrische Sensorkalibrierung am Boden bestimmt werden.  $E_{Gk}$  ist durch terrestrisch-radiometrische Messungen während der Fernerkundungsmission zu ermitteln (Abschnitt 3.5.2).  $\tau_{Ak}(0)$  stellt den Transmissionsgrad der Atmosphäre vom Boden bis zur Höhe des Sensors (bei lotrechtem Strahlungspfad) dar und kann daher nur für Satellitenaufnahmen durch terrestrische Messung nach Abschnitt 3.5.3 berechnet werden. Für Aufnahmen aus dem Flugzeug ist allenfalls eine Abschätzung mit Hilfe eines Atmosphärenmodells möglich, oder aber  $\tau_{Ak}(0)$  muß als verbleibende Unbekannte mit Hilfe von Probeflächen bekannten (terrestrisch gemessenen) gerichteten Reflexionsgrades bestimmt werden.

Ebenso kann  $L_{Lk}(\theta, \phi)$  in (6.5-17) nicht direkt vom Boden aus gemessen, sondern nur indirekt mit Hilfe eines Atmosphärenmodells abgeschätzt werden.  $A_k$  in (6.5-17) ist wieder durch radiometrische Sensorkalibrierung am Boden zu ermitteln (Messung des Signals bei abgedeckter Sensoroptik).  $a_k(\theta, \phi)$  bzw.  $a_k(x, y)$  kann aber auch, in Erweiterung der im Abschnitt 6.5.1 beschriebenen Methode, aus dem Fernerkundungsbild selbst (besser: aus mehreren in unmittelbarer zeitlicher Folge aufgenommenen Bildern) ohne jede Zusatzinformation abgeschätzt werden: Man unterteilt dazu z.B. jedes Fernerkundungsbild der Bildfolge in eine Anzahl (z.B.  $10 \times 10$ ) gleich großer Rasterzellen und ermittelt für jede der 100 Rasterzellen und für jeden Kanal  $k$  das Minimum aller Bildelementwerte sämtlicher Bilder. Die Koeffizienten des Polynomansatzes für  $a_k(\theta, \phi)$  bzw.  $a_k(x, y)$  gemäß (6.5-19) werden dann so bestimmt, daß sich die Funktion  $a_k(x, y)$  an die gegebene Verteilung der Minima möglichst gut anschmiegt, ohne den Wert irgend eines Minimums zu überschreiten. (Bild 6.5-3 illustriert diese Methode für eine digitale Zeilenkamera.)

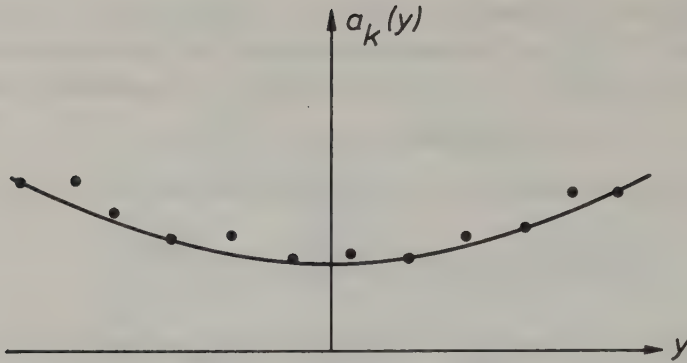


Bild 6.5-3: Zur Abschätzung des blickrichtungsabhängigen additiven Korrekturterms  $a_k(y)$  im eindimensionalen Fall (z.B. digitale Zeilenkamera)

Nach durchgeführter radiometrischer Rektifizierung mit Berücksichtigung von Blickrichtungseffekten der Stufe 1 sind im Bild im allgemeinen noch objektbedingte Blickrichtungsabhängigkeiten vorhanden, die bei der weiteren Auswertung (z.B. automatische Klassifizierung, siehe Abschnitt 6.8) sehr stören können. Eine Kompensation dieser objektbedingten Blickrichtungseffekte (Stufe 2) ist streng genommen - wie schon erwähnt - nur für eine Objektklasse bzw. näherungsweise für einander ähnliche Objektklassen (genauer: Objektklassen mit gleicher oder ähnlicher Richtungsabhängigkeit des gerichteten Reflexionsgrades) möglich. Man wählt Probeflächen dieser Objektklasse(n) aus, die unter verschiedenen Blickrichtungen  $\theta, \phi$  vom Sensor erfaßt sind, setzt ein Polynom für die Richtungsabhängigkeit des gerichteten Reflexionsgrades  $\rho_{rk}(\theta, \phi)$  an und bestimmt die Koeffizienten durch Regression. Der Polynomansatz sollte die zu erwartenden Symmetrieeigenschaften von  $\rho_{rk}(\theta, \phi)$  bzw.  $\rho_{rk}(x, y)$  (im allgemeinen eine Symmetrie um das Azimut des Sonneneinfalls) widerspiegeln. Ein geeigneter Ansatz ist z.B.

$$\rho_{rk}(x, y) = r_{00k} + r_{01k}y + r_{20k}x^2 + r_{02k}y^2 + r_{21k}x^2y + \dots, \quad (6.5-20)$$

wenn die y-Bildkoordinatenachse parallel zur Sonneneinfallsrichtung liegt (Bild 6.5-2). Zur Durchführung der Blickrichtungskorrektur der Stufe 2 ist dann jedes Bildelement mit einem Faktor

$$k(x, y) = \frac{\rho_{rk}(0, 0)}{\rho_{rk}(x, y)} = \left(1 + \frac{r_{01k}}{r_{00k}}y + \frac{r_{20k}}{r_{00k}}x^2 + \frac{r_{02k}}{r_{00k}}y^2 + \frac{r_{21k}}{r_{00k}}x^2y + \dots\right)^{-1} \quad (6.5-21)$$

zu multiplizieren. Gehört das Bildelement der (den) gewählten Objektklasse(n) an, so wird der nach der Stufe 1 korrigierte Bildelementwert  $g_k(x,y)$  =  $\rho_{rk}(x,y)$  damit in den Wert

$$g_{k, \text{rekt}}(x,y) = k(x,y) \cdot g_k(x,y) = \rho_{rk}(0,0) \quad (6.5-22)$$

übergeführt. Die Bildelementwerte aller anderen Objektklassen sind nach einer solchen Korrektur aber nicht ein Maß für den senkrecht nach oben gerichteten Reflexionsgrad. Eine diesbezügliche Blickrichtungskorrektur mittels der Objektklasse 1 ist im Bild 6.5-4 veranschaulicht.

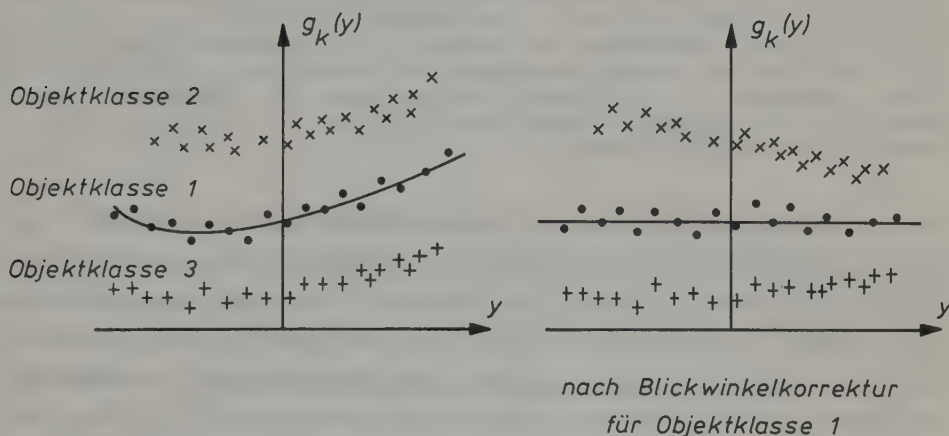


Bild 6.5-4: Blickrichtungskorrektur (Stufe 2) für Objektklasse 1

Es soll hier nochmals betont werden, daß eine Blickrichtungskorrektur der Stufe 2 nur dann sinnvoll ist, wenn die interessierenden Objektklassen eine gleiche oder eine sehr ähnliche relative Richtungsverteilung des gerichteten Reflexionsgrades aufweisen. Diese Voraussetzung ist z.B. bei allen Oberflächenarten mit Reihenstrukturen (gepflügter Ackerboden mit Furchen; Vegetationsbestand in Reihenform, z.B. Mais, Weinreben) nicht erfüllt, da die Reflexionsgradverteilung von der Richtung der Reihenstruktur abhängt !

Ist eine Blickrichtungskorrektur der Stufe 2 durchzuführen, ohne daß die absolute Größe des Reflexionsgrades der Geländeoberfläche interessiert, so

kann auf die Blickrichtungskorrektur der Stufe 1 verzichtet werden. Es wird ein Polynom

$$g_k(x,y) = g_{00k} + g_{01k}y + g_{20k}x^2 + g_{02k}y^2 + g_{21k}x^2y + \dots \quad (6.5-23)$$

angesetzt, das nun alle Blickrichtungseffekte (sensor-, atmosphären- und objektbedingt) enthält. Die Koeffizienten werden wieder durch Regressionsanalyse bestimmt. Die Blickrichtungskorrektur erfolgt in Analogie zu (6.5-21) und (6.5-22).

Abschließend sei noch erwähnt, daß die oft unerwünschten objektbedingten Blickrichtungseffekte, die wir hier zu kompensieren versucht haben, andererseits auch bewußt als Klassifizierungsmerkmale ausgenutzt werden können. Voraussetzung dazu ist, daß ein und dasselbe Gebiet von mehreren (mindestens zwei) Sensorpositionen aus aufgenommen wird, wie es z.B. bei photographischen Luftbilddaufnahmen mit mindestens 50% Längsüberdeckung der Fall ist, aber auch mit Satellitensensoren mit schwenkbarer Aufnahmerichtung (SPOT, Abschnitt 4.2.9) realisiert werden kann. Ein einfaches Beispiel einer solchen "stereoradiometrischen" Bildauswertung findet sich in Schneider, Lantschner, 1980.

### 6.5.3 Wirkung der Differenz- und Verhältnisbildung von Bildkanälen

Im Zusammenhang mit der radiometrischen Rektifizierung von Fernerkundungsbildern soll auch die Wirkung der Differenz- und Verhältnisbildung von Bildkanälen diskutiert werden. Diese Operationen haben nämlich eine ähnliche Wirkung wie eine relative radiometrische Rektifizierung. Es werden dabei neue Bilddaten  $g'$  erzeugt, die quantitativ miteinander verglichen werden können, auch wenn sie unter verschiedenen Aufnahmebedingungen gewonnen worden sind.

Wir setzen im folgenden, wie im Abschnitt 6.5.2, einen linearen Detektor voraus, lassen jedoch die Beschränkung auf ebenes Gelände fallen und nehmen nicht-Lambertsche Oberflächen an. Wir beschränken zunächst die Betrachtungen auf eine einzige Bildszene, innerhalb der aber beliebige Blickrichtungseffekte vorkommen können. Gleichung (6.5-15) kann daher in verallgemeinerter Form als

$$g_k(\theta, \phi, \alpha, \beta, Z) = m_k(\theta, \alpha, \beta, Z) \cdot \rho_{rk}(\theta, \phi) + a_k(\theta, \phi, Z) \quad (6.5-24)$$

geschrieben werden. Die Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  geben hier Neigung und Exposition der Geländeoberfläche an.  $Z$  ist die Geländehöhe.  $\alpha$  und  $\beta$  beeinflussen vor allem die in  $m_k$  enthaltene Bestrahlungsstärke der Geländeoberfläche,  $Z$  wirkt sich ebenfalls auf die Bestrahlungsstärke, auf den Transmissionsgrad



der Atmosphäre sowie auf das in  $a_k$  enthaltene Luftlicht aus.

Die spektrale Verteilung des Reflexionsgrades sei richtungsunabhängig, die Blickrichtung beeinflusse nur die Größe des Reflexionsgrades, dies jedoch für alle Kanäle in der selben Weise. Der gerichtete Reflexionsgrad  $\rho_{rk}(\theta, \phi)$  kann dann in einen kanalabhängigen Faktor  $\rho_k$  und in einen richtungsabhängigen Faktor  $\rho_r(\theta, \phi)$  aufgespalten werden:

$$\rho_{rk}(\theta, \phi) = \rho_k \cdot \rho_r(\theta, \phi) \quad (6.5-25)$$

Für alle Kanäle  $k$ , für die  $m_k$  und  $a_k$  unabhängig von der Kanalnummer sind, für die also gilt:

$$m_k(\theta, \alpha, \beta, Z) = m(\theta, \alpha, \beta, Z) \quad (6.5-26)$$

und

$$a_k(\theta, \phi, Z) = a(\theta, \phi, Z) \quad (6.5-27)$$

folgt

$$\frac{g_{k_1}(\theta, \phi, \alpha, \beta, Z) - g_{k_2}(\theta, \phi, \alpha, \beta, Z)}{g_{k_3}(\theta, \phi, \alpha, \beta, Z) - g_{k_4}(\theta, \phi, \alpha, \beta, Z)} = \frac{\rho_{k_1} - \rho_{k_2}}{\rho_{k_3} - \rho_{k_4}} = g'_{k_1 k_2 k_3 k_4} \quad (6.5-28)$$

Eine Kanalkombination dieser Form (Quotient von Differenzen) liefert also Bildelemente  $g'$ , die unabhängig von Blickrichtung und Geländeform sind. Die Voraussetzungen (6.5-26) und insbesondere (6.5-27) sind jedoch nur für nahe benachbarte Spektralkanäle und auch dafür nur näherungsweise erfüllt.

Kann man anstatt (6.5-27)

$$a_k(\theta, \phi, Z) = 0 \quad (6.5-29)$$

annehmen, so liefert auch die reine Verhältnissbildung von Spektralkanälen blickrichtungs- und geländeformunabhängige Bildelementwerte:

$$\frac{g_{k_1}(\theta, \phi, \alpha, \beta, Z)}{g_{k_2}(\theta, \phi, \alpha, \beta, Z)} = \frac{\rho_{k_1}}{\rho_{k_2}} = g_{k_1 k_2} \quad (6.5-30)$$

Die Bedingung (6.5-29) kann in langwelligen Spektralbereichen näherungsweise erfüllt sein und ist für alle Spektralbereiche durch eine Blickrichtungskorrektur nach Abschnitt 6.5.2 zu erreichen. Die Verhältnissbildung bringt dann eine weitgehende Unabhängigkeit von der Geländeform.

#### 6.5.4 Berücksichtigung von Detektor-Nichtlinearitäten

Bei den bisherigen Betrachtungen radiometrischer Rektifizierungsverfahren wurden lineare Detektoren vorausgesetzt, die ein der Detektorbestrahlungsstärke proportionales Signal liefern. Liegen Detektor-Nichtlinearitäten vor, so müssen diese vor Durchführung der eigentlichen radiometrischen Rektifizierung kompensiert werden.

Der in der Praxis wichtigste nichtlineare Detektor für Fernerkundungszwecke ist der photographische Film. Wir diskutieren in diesem Abschnitt daher exemplarisch die radiometrische Rektifizierung digitalisierter Farbinfrarotbilder.

Ein Diapositiv eines Farbinfrarotbildes sei mit einem Photoabtaster in den drei Farbauszügen Blau, Grün und Rot digitalisiert (siehe Abschnitt 6.2). Wir vernachlässigen der Einfachheit halber alle Blickrichtungseffekte, d.h. wir beschränken uns auf Bildbereiche nahe der Bildmitte. Wir gehen daher von Gleichung (6.5-1) aus, ersetzen aber den durch die Koeffizienten  $R_k$  und  $A_k$  gegebenen linearen Zusammenhang zwischen  $\bar{x}_k$  und  $g_k$  durch die nichtlineare Funktion  $g_k = f_k(\bar{x}_k)$ .  $g_k$  ist hier ein Bildelementwert eines digitalisierten Luftbildes im Spektralkanal  $k$  ( $k = 1, 2$  oder  $3$ , entsprechend den drei strahlungsempfindlichen Schichten, siehe Abschnitt 3.1.1.4.4), wobei  $g_k$  proportional der photographischen Dichte  $D$  des Original-Diapositives im Spektralbereich  $k$  sei.  $\bar{x}_k$  ist der bei der Filmbelichtung auf die Fläche des Bildelementes gefallene Strahlungsfluß, der proportional zur Bestrahlung  $H_k$  (Bestrahlungsstärke  $\times$  Bestrahlungszeit, siehe Abschnitt 3.1.1.4.2) ist. Die drei Funktionen  $f_k$  sind daher - bei entsprechender Skalierung der Abszisse - durch die drei "Schwärzungskurven" des Farb-Infrarotfilmes gegeben (Bild 3.1-15 zeigt eine solche Schwärzungskurve, allerdings für ein Negativ).

Da die Schwärzungskurven nicht nur vom Filmtyp abhängen, sondern von Filmrolle zu Filmrolle etwas variieren können und darüber hinaus von der Filterung und der Entwicklung beeinflusst werden, sollten sie für jeden abweichend gefilterten oder einzeln entwickelten Filmstreifen getrennt bestimmt werden. Man belichtet dazu - wie schon im Abschnitt 5.3.2 erwähnt - in der Dunkelkammer mit einem "Sensitometer" am Beginn und am Ende des Filmstreifens einen Grau- bzw. Farbstufenkeil auf den Film (wenn ein solcher Keil nicht schon als Hilfsabbildung von der Meßkamera zu jedem Meßbild automatisch aufbelichtet wird; siehe Bild 3.1-5). Nach Digitalisierung des Keils

in den drei Spektralbereichen können bei Kenntnis der Strahlungsflußwerte  $\bar{g}_k$  für die einzelnen Graukeilstufen die Funktionen  $g_k = f_k(\bar{g}_k)$  ermittelt werden (siehe Bild 5.3-1).

Oft sind nicht die absoluten Strahlungsflußwerte  $\bar{g}_k$  bekannt, sondern nur der Faktor, um den sich die Strahlungsflußwerte benachbarter Graukeilstufen unterscheiden. In diesem Fall enthalten die Funktionen  $g_k = f_k(\bar{g}_k)$  eine unbekannte Skalierung (einen unbekannten Faktor) der unabhängigen Variablen  $\bar{g}_k$ .

Sind die Funktionen  $f_k$  auf diese Weise bestimmt, so kann man daraus die inverse Funktion  $\bar{g}_k = f_k^{-1}(g_k)$  ermitteln und damit jedes Bildelement  $g_k$  der digitalisierten Farbinfrarotbilder in einen "linearisierten Bildelementwert"

$$g_{k,lin} = c_k \cdot \bar{g}_k = c_k \cdot f_k^{-1}(g_k) \quad (6.5-31)$$

umwandeln, wobei  $c_k$  ein für alle Bildelemente im Spektralkanal  $k$  konstanter, jedoch zunächst oft unbekannter Faktor ist. Die praktische Realisierung der Umwandlung von  $g_k$  in  $g_{k,lin}$  erfolgt zweckmäßigerweise mit "Look-up-Tabellen" (siehe Abschnitt 6.6.1).

Aus (6.5-1) und (6.5-31) folgt nun:

$$g_{k,lin} = c_k \cdot G_k \cdot (E_{Gk} \cdot \rho_k \cdot \tau_{Ak} + \pi \cdot L_{Lk}) = m_k \cdot \rho_k + a_k \quad (6.5-32)$$

Die weitere Auswertung kann analog zu den oben besprochenen Methoden durchgeführt werden. Im konkreten Fall der radiometrischen Rektifizierung von photographischen Farbinfrarotbildern ergibt sich eine gewisse Schwierigkeit durch die Breite der einzelnen Spektralkanäle. Wie aus den Filmdaten ersichtlich ist (siehe Bild 3.1-20), erstreckt sich z.B. die spektrale Empfindlichkeit der "infrarot-empfindlichen" Filmschicht nicht nur über das nahe Infrarot, sondern auch über den gesamten Bereich des sichtbaren Lichtes (wovon allerdings das Blaue ausgefiltert wird). Es ergibt sich nun die Frage nach der konkreten Bedeutung von  $\rho_k$  in Gleichung (6.5-32) insbesondere dann, wenn das spektrale Reflexionsvermögen  $\rho(\lambda)$  stark wellenlängenabhängig ist (wie z.B. für Vegetation). Dieses Problem soll daher im folgenden noch speziell besprochen werden.

### 6.5.5 Radiometrische Rektifizierung im Falle breiter spektraler Empfindlichkeitsbereiche der Detektoren

Wir betrachten weiterhin als Beispiel die radiometrische Rektifizierung von Farbinfrarotbildern. Bei der Bildaufnahme fällt ein spektraler Strahlungsfluß  $\Phi_\lambda$  auf den Film, woraus sich der für die lichtempfindliche Schicht k wirksame Strahlungsflußwert  $\Phi_k$  gemäß (3.1-23) aus

$$\Phi_k = \int \Phi_\lambda S_{k\lambda} d\lambda \quad (6.5-33)$$

berechnen läßt.  $S_{k\lambda}$  ist hier eine dimensionslose Funktion der Wellenlänge, welche die spektrale Empfindlichkeit der Filmschicht k beschreibt. Es ist zweckmäßig,  $S_{k\lambda}$  so zu normieren, daß der Maximalwert gleich Eins wird. Die Beziehung (6.5-32) kann nun in folgender Form geschrieben werden:

$$g_{k,lin} = c_k \cdot G_k \int E_{G\lambda} \cdot \tau_A(\lambda) \cdot S_{k\lambda} \cdot \rho(\lambda) \cdot d\lambda + \pi \cdot c_k \cdot G_k \int L_{L\lambda} \cdot S_{k\lambda} \cdot d\lambda \quad (6.5-34)$$

Unser Ziel ist es, die konkrete Bedeutung von  $\rho_k$  in (6.5-32) zu erkennen. Wir versuchen zu diesem Zweck, (6.5-32) formal mit (6.5-34) zu vergleichen, und treffen dazu folgende vereinfachende Annahmen:

$$\begin{aligned} E_{G\lambda} &= E_{Gk} \cdot E_{Gk\lambda}^{rel} \\ \tau_A(\lambda) &= \tau_{Ak} \cdot \tau_{Ak\lambda}^{rel} \end{aligned} \quad (6.5-35)$$

Wir spalten also die wellenlängenabhängigen Größen  $E_{G\lambda}$  (spektrale Bestrahlungsstärke durch Globalstrahlung) und  $\tau_A(\lambda)$  (spektraler Transmissionsgrad der Atmosphäre) jeweils in einen für den Spektralkanal k repräsentativen integralen Wert ( $E_{Gk}$  bzw.  $\tau_{Ak}$ ) und in eine die relative Wellenlängenabhängigkeit beschreibende Funktion ( $E_{Gk\lambda}^{rel}$  bzw.  $\tau_{Ak\lambda}^{rel}$ ) auf. Aus (6.5-34) folgt damit:

$$\begin{aligned} g_{k,lin} &= c_k G_k E_{Gk} \tau_{Ak} \int E_{Gk\lambda}^{rel} \cdot \tau_{Ak\lambda}^{rel}(\lambda) \cdot S_{k\lambda} \rho(\lambda) d\lambda + \pi c_k G_k \int L_{L\lambda} S_{k\lambda} d\lambda \\ &\quad (6.5-32) \\ &= c_k \cdot G_k (E_{Gk} \cdot \tau_{Ak} \cdot \rho_k + \pi \cdot L_{Lk}) = m_k \cdot \rho_k + a_k, \end{aligned} \quad (6.5-36)$$

sodaß

$$\rho_k = \int E_{Gk\lambda}^{rel} \cdot \tau_{Ak\lambda}^{rel}(\lambda) \cdot S_{k\lambda} \cdot \rho(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (6.5-37)$$

Der durch radiometrische Rektifizierung von Fernerkundungsbildern mit breiten Spektralkanälen erhaltene Reflexionsgrad  $\rho_k$  der Oberflächen stellt zwar einen Mittelwert des spektralen Reflexionsgrades  $\rho(\lambda)$  dar, der aber nicht nur mit der spektralen Empfindlichkeit  $S_{k\lambda}$  der Detektoren, sondern auch mit der spektralen Verteilung  $E_{Gk\lambda}$  der Globalstrahlung sowie mit dem spektralen Transmissionsgrad  $\tau_{Ak}(\lambda)$  der Atmosphäre gewichtet ist. Es ist einleuchtend, daß diese Mittelung mit einer z.T. variierenden Gewichtung einen Informationsverlust darstellt, woraus die Bedeutung und der Vorteil einer hohen spektralen Auflösung ersichtlich werden.



## 6.6 Einfache Grauwertoperationen

In diesem Kapitel beschränken wir uns auf Bilder in einem Spektralbereich, also auf Schwarzweißbilder. Die Bildmatrix  $\underline{G}$  ist zweidimensional; ihre Bildelemente werden mit  $g_{ij}$  bezeichnet. In diesem Abschnitt werden wir auf die Verbindung der Grauwerte  $g_{ij}$  mit den radiometrischen Größen, die im Abschnitt 6.5 im Vordergrund standen, wenig Rücksicht nehmen.

### 6.6.1 Kontrast- und Helligkeitsveränderung

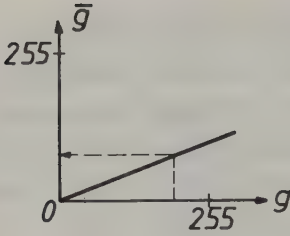
Dabei wird jedes Bildelement  $g_{ij}$  des ursprünglichen Bildes  $\underline{G}$  zu einem Bildelement  $\bar{g}_{ij}$  verändert. Die Bildelemente  $\bar{g}_{ij}$  stellen in ihrer Gesamtheit ein neues Bild  $\bar{\underline{G}}$  dar. Die einfachste diesbezügliche Transferfunktion, die auch als Kontrastübertragungsfunktion<sup>1</sup> bzw. nur als Übertragungsfunktion bezeichnet wird, lautet:

$$\boxed{\bar{g}_{ij} := c \cdot g_{ij} + d} \quad (6.6-1)$$

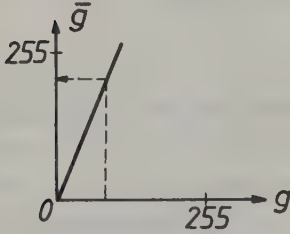
c ... verantwortlich für Kontrast  
d ... verantwortlich für Helligkeit

Das Bild 6.6-1 zeigt, wie man mit der Wahl der Parameter c und d den Kontrast und die Helligkeit verändern kann. (Im Rahmen der relativen radiometrischen Rektifizierung (6.5-10) ist c der Parameter m' und d der Parameter a'.)

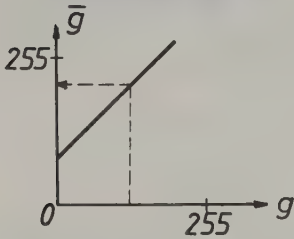
<sup>1</sup> Eine treffendere Bezeichnung wäre "Intensitätsübertragungsfunktion". Es werden nämlich die einzelnen Grauwerte unabhängig voneinander verändert und nur die Zusammenschau aller Grauwerte eines Bildes ergibt eine Kontrastveränderung. Wir bleiben aber in diesem Buch bei dem weit verbreiteten Ausdruck "Kontrastübertragungsfunktion". Im Abschnitt 6.7.3 lernen wir ebenfalls eine Kontrastübertragungsfunktion kennen. Mit den dort erläuterten Begriffen müßte man die Kontrastübertragungsfunktion in diesem Abschnitt 6.6 mit Kontrastübertragungsfunktion im Ortsbereich und die im Abschnitt 6.7.3 benutzte Kontrastübertragungsfunktion mit Kontrastübertragungsfunktion im Frequenzbereich bezeichnen.



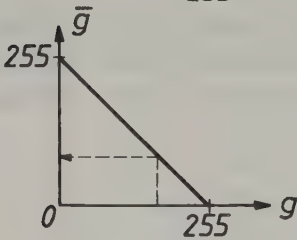
*Dämpfung des Kontrastes*  
 $c < 1, d = 0$



*Erhöhung des Kontrastes*  
 $c > 1, d = 0$



*Kontrast bleibt,  
 Helligkeit wird erhöht*  
 $c = 1, d > 0$



*Komplement der Grauwerte,  
 z.B.: Negativ aus Positiv*  
 $c = -1, d = 255$

Bild 6.6-1: Kontrast- und Helligkeitsveränderung mit einer linearen Übertragungsfunktion

Die Kontrastveränderung kann auch intervallweise erfolgen (Bild 6.6-2). Anstelle einer linearen Übertragungsfunktion können auch andere Funktionen gewählt werden. Im Bild 6.6-3 sind zwei allgemeine Funktionen angedeutet.

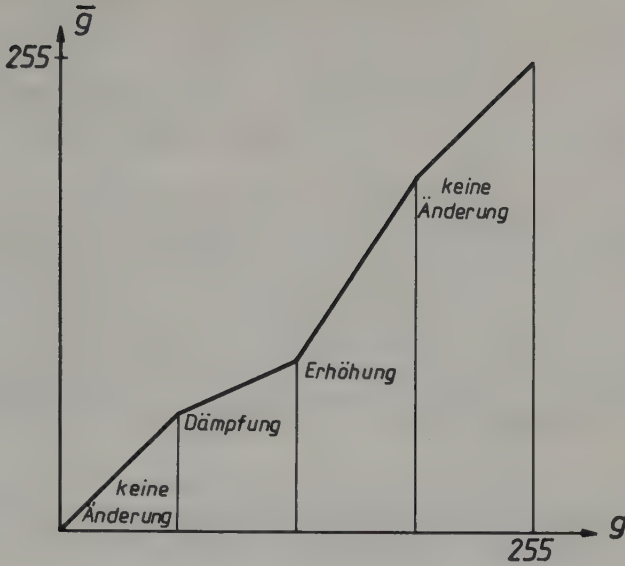


Bild 6.6-2: Kontrastveränderung mit unterschiedlicher linearer Übertragungsfunktion in den jeweiligen Intervallen

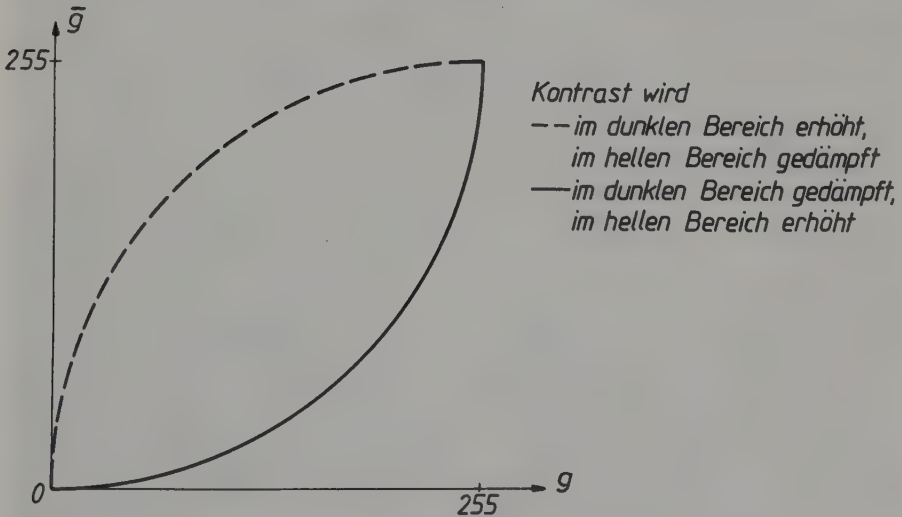


Bild 6.6-3: Kontrastveränderung abhängig vom Grauwert

Mit einer solchen Kontrastveränderung abhängig vom Grauwert werden z.B. die Nichtlinearitäten der Detektoren (6.5.4) korrigiert. Ein anderes Beispiel hängt mit der spezifischen Empfindlichkeit des menschlichen Auges zusammen.

Da die Empfindlichkeit des menschlichen Auges im wesentlichen proportional zum dekadischen Logarithmus der Opazität verläuft (3.1.1.4.2), wandelt man digitale Bilder vor Ausgabe auf Film gerne mit einer logarithmischen Funktion um. Denn nur ein logarithmisch dichterwerdender Graukeil wird vom menschlichen Auge als linear empfunden. Eine logarithmische Übertragungsfunktion ist deshalb in den meisten Bildausgabegeräten permanent gespeichert und kann durch ein einfaches Bedienungselement bei der Bildausgabe aktiviert werden.

Um Rechenzeiten zu sparen, löst man die mit der Funktion (6.6-1) - und mit anderen Funktionen - formulierten Kontrast- und Helligkeitsveränderungen in einem Bildverarbeitungssystem mit sogenannten Nachschautabellen bzw. Look-up-Tabellen (look up tables). Zu diesem Zweck werden zunächst für alle Grauwerte  $\bar{g}_{ij}$  - in der Regel zwischen 0 und 255 - die Grauwerte  $\bar{g}_{ij}$  berechnet und in einer Tabelle im Arbeitsspeicher abgelegt. Bei der eigentlichen Verarbeitung des Bildes ist dann jeweils nur an der Stelle  $\bar{g}_{ij}$  der Tabelle "nachzuschauen"; man erhält auf diese Weise ohne Rechnung den jeweiligen neuen Grauwert  $\bar{g}_{ij}$ . (Auf die hardwaremäßige und daher sehr schnelle Bildausgabe über Look-up-Tabellen wird im Abschnitt 6.11.1 näher eingegangen.)

Bei den erwähnten Grauwertmanipulationen ist darauf zu achten, daß die neuen Grauwerte  $\bar{g}_{ij}$  innerhalb des verfügbaren Wertebereiches ( $\bar{g}_{\min}$  bis  $\bar{g}_{\max}$ ) bleiben (z.B.  $\bar{g}_{\min} = 0$  und  $\bar{g}_{\max} = 255$ ). Bei Bereichsüberschreitungen ist zu fordern:

wenn  $\bar{g}_{ij} > \bar{g}_{\max}$  ("Überbelichtung"), dann setze  $\bar{g}_{ij} := \bar{g}_{\max}$   
 wenn  $\bar{g}_{ij} < \bar{g}_{\min}$  ("Unterbelichtung"), dann setze  $\bar{g}_{ij} := \bar{g}_{\min}$ .

Eine Überschreitung der Grenzen des Wertebereiches kann von vornherein nicht auftreten, wenn man die Koeffizienten c und d wie folgt berechnet:

$$c = \frac{255}{\bar{g}_{\max} - \bar{g}_{\min}} \quad d = -c \cdot \bar{g}_{\min}$$

Bei der nun zu besprechenden Grauwertoperation mit einem Histogramm tritt ebenfalls keine Überschreitung der Grenzen des Wertebereiches auf. Die Bedeutung der Arbeitsweise mittels eines Histogrammes bietet darüber hinaus den großen Vorteil, daß man Bilder erzeugen kann, in denen jeder Grauwert im wesentlichen gleich häufig vertreten ist. Solche Bilder empfindet der menschliche Betrachter als "ausgewogen". Ein Häufigkeitshistogramm eines Bildes  $\underline{g}$  ist im Bild 6.6-4 dargestellt (Iststand); das gesuchte Bild  $\underline{g}$  soll eine horizontal verlaufende Kennlinie haben. Man spricht deshalb auch von Histogrammeinebnung (histogram equalization).

Die Durchführung einer Histogrammeinebnung soll anhand des Bildes 6.6-5, einer LANDSAT-TM-Szene, Kanal 4 (4.2.3), mit 250000 Bildelementen, erläutert werden:



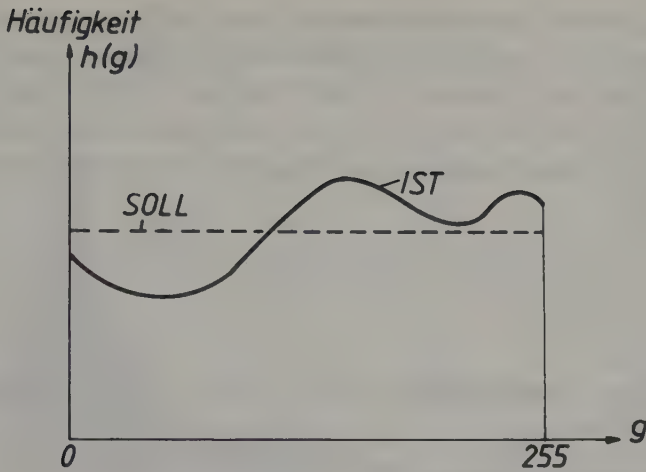


Bild 6.6-4: Häufigkeitsverteilung (Histogramm) eines gegebenen (IST) und eines gewünschten (SOLL) Bildes

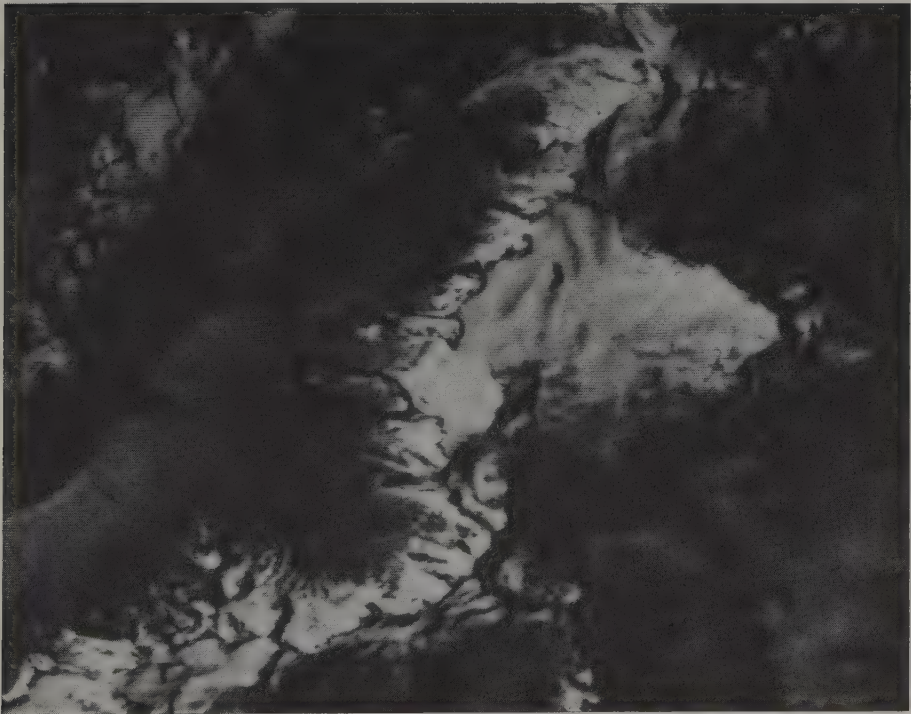


Bild 6.6-5: Gegebenes (Satelliten-)Bild

a) Berechnung des Häufigkeitshistogrammes. Dabei wird für jeden Grauwert  $g$  seine Häufigkeit  $h(g)$  innerhalb des Bildes ermittelt, wobei  $g$  von 0 in Stufen von 1 bis 255 läuft, also  $g = 0(1)255$ . Man sieht (Bild 6.6-6a), daß die dunklen Grauwerte (Maximum  $h(g_{45}) = 5065$ ) überwiegen; beim Grauwert  $g = 147$  ist noch ein kleines Nebenmaximum. Insgesamt sind die hellen Grauwerte unterrepräsentiert.

b) Ermittlung der Summenhäufigkeit  $S_h(g)$  (Bild 6.6-6b):

$$S_h(g) = \sum_{k=0}^g h(k) \quad (6.6-2)$$

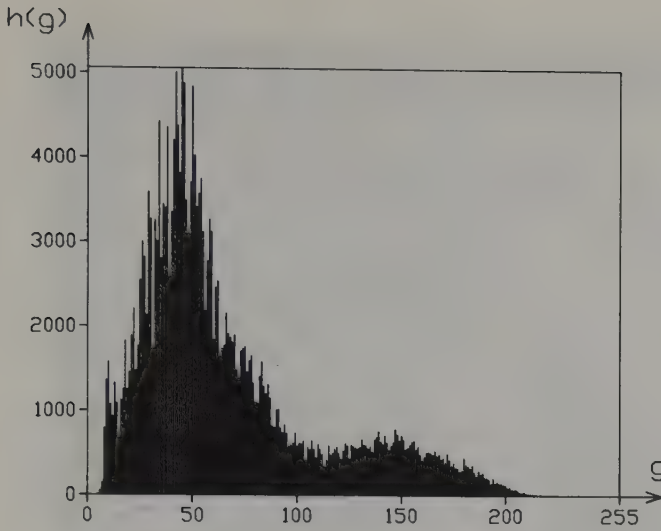
c) Normierung der Summenhäufigkeit  $S_h(g)$  auf den größten Grauwert. In unserem Fall auf 255:

$$\hat{S}_h(g) = 255 \cdot S_h(g) / 250000 \quad (6.6-3)$$

d) Verwendung der normierten Summenhäufigkeit  $\hat{S}_h(g)$  als Übertragungsfunktion (Bild 6.6-6c,d):

$$g_{ij} \rightarrow \bar{g}_{ij} \quad (6.6-4)$$

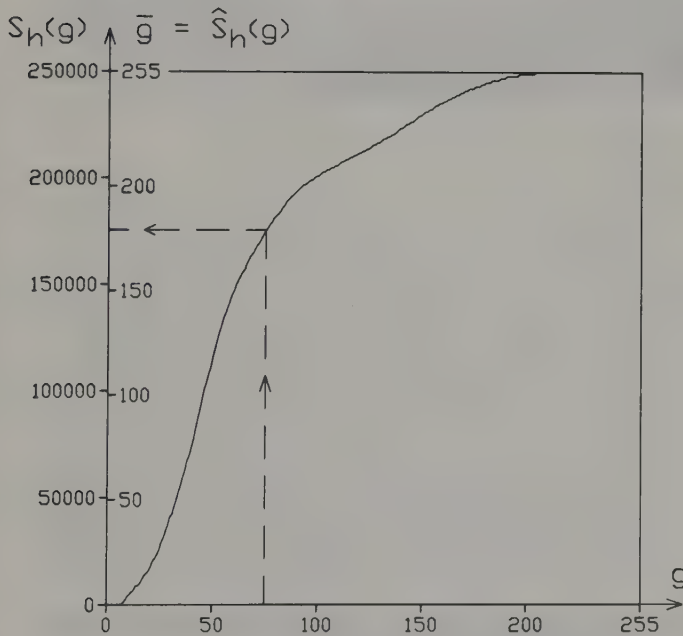
Die Zuordnung von  $g$  zu  $\bar{g}$  entspricht der Look-up-Tabelle für die Histogrammeinebnung. Mit dieser Look-up-Tabelle wurde das gegebene Bild 6.6-5 in ein neues Bild 6.6-7 überführt, und für das neue Bild auch ein Histogramm ermittelt (Bild 6.6-6e).



Einige Werte:

g	h(g)
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	12
6	54
7	146
8	796
9	1371
10	1578
11	1078
12	942
13	1329
14	1097
15	680
16	1136
.	.
45	5065

Bild 6.6-6a Histogramm des gegebenen Bildes



Einige Werte:

g	$S_h(g)$	$\hat{S}_h(g)$	$\bar{g}$
0	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	12	0	0
6	66	0.1	0
7	212	0.2	0
8	1008	1.0	1
9	2379	2.4	2
10	3957	4.0	4
11	5035	5.1	5
12	5977	6.1	6
13	7306	7.4	7
14	8403	8.6	9
15	9083	9.3	9
16	10219	10.4	10

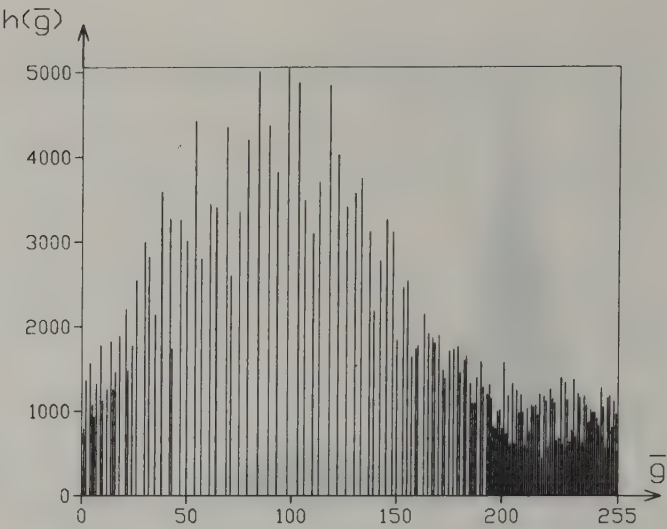
Bild 6.6-6b: Summenhäufigkeit  $S_h(g)$

Bild 6.6-6c: Normierte Summenhäufigkeit  $\hat{S}_h(g)$

Bild 6.6-6d: Übertragungsfunktion (Look-up-Tabelle)

Einige Werte:

$\bar{g}$	$h(\bar{g})$
0	212
1	796
2	1371
3	0
4	1578
5	1078
6	942
7	1329
8	0
9	1777
10	1136
.	.
.	.
98	5065



6.6-6e: Histogramm des bearbeiteten Bildes

Einige Werte:

$\bar{g}$	$h(\bar{g})$
8	14578
24	14409
40	16877
56	13730
72	17967
88	13235
104	16569

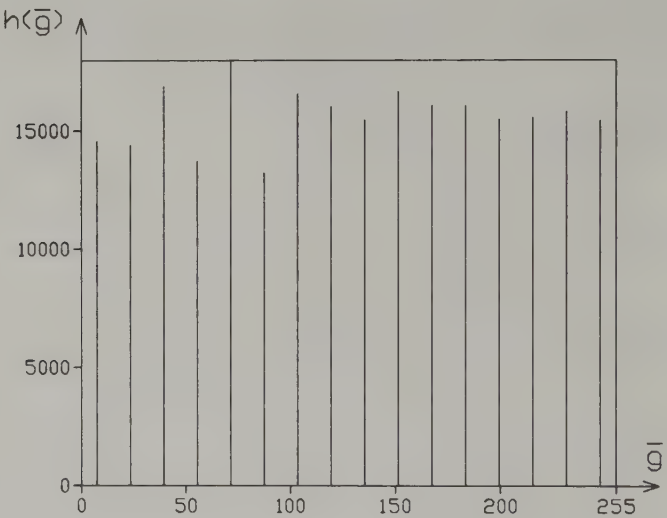
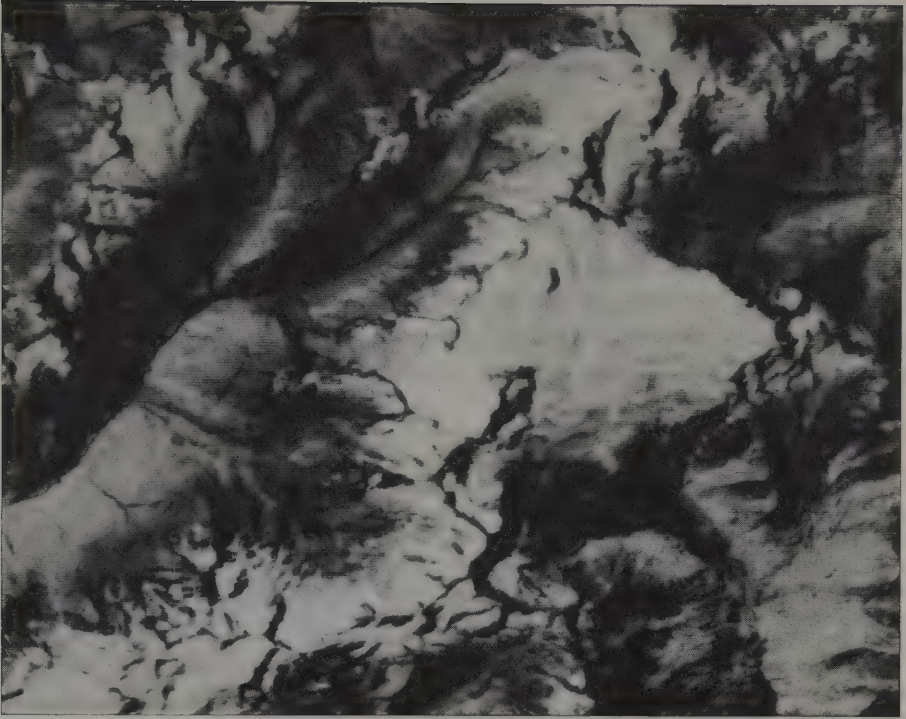


Bild 6.6-6f: Histogramm des bearbeiteten, aber zu 16 Grauwertstufen zusammengefaßten Bildes





*Bild 6.6-7: Bild 6.6-5 nach Histogrammeinebnung*

Der Vergleich der Bilder 6.6-5 und 6.6-7 zeigt, daß durch diesen Bildverarbeitungsprozeß eine wesentliche Verbesserung erreicht werden konnte. Das Histogramm des bearbeiteten Bildes (Bild 6.6-6e) veranschaulicht die Wirkungsweise der Histogrammeinebnung: Die Zonen mit großen Häufigkeiten  $g(h)$  werden auf der Grauwertskala gestreckt und die Zonen mit geringen Häufigkeiten  $g(h)$  werden komprimiert. Die prognostizierte Einebnung des Histogrammes ist (zunächst) aber nicht ersichtlich. Faßt man allerdings die Grauwerte des bearbeiteten Bildes 6.6-7 in 16 Grauwertstufen zusammen (6.6.2) und bildet man dafür ein Histogramm, dann erkennt man die Gleichverteilung der Grauwerte sehr gut (Bild 6.6-6f).

Die Histogrammeinebnung hat aber auch einen Nachteil, der nicht unerwähnt bleiben soll. In den Zonen mit geringen Häufigkeiten  $h(g)$ , die im Histogramm komprimiert werden, verliert das Bild durch die Histogrammeinebnung Grauwertabstufungen. Z.B. trat beim ursprünglichen Bild der Grauwert  $g = 14$

insgesamt 1097mal und der Grauwert  $g = 15$  insgesamt 680mal auf (Tabelle zu Bild 6.6-6a). Durch die Histogrammeinebnung wurden diese 1777 Bildelemente zu einem Grauwert  $\bar{g} = 9$  zusammengefaßt (Tabellen zu Bild 6.6-6bcde).

In der Bildverarbeitung wird deshalb anstelle einer Histogrammeinebnung häufig eine lineare Streckung (stretching) des gegebenen Grauwertbereiches auf den verfügbaren Grauwertbereich durchgeführt. Außerdem setzt man den mittleren Grauwert, der in unserem Beispiel übrigens  $g_{\text{mittel}} = 67$  ist, auf  $\bar{g}_{\text{mittel}} = 127$ . Eine lineare Streckung ist allerdings nur dann zielführend, wenn am Anfang und/oder am Ende des Histogrammes des ursprünglichen Bildes keine Grauwerte vorhanden sind. Vereinzelte Grauwerte in den Randbereichen können auch zusammengefaßt werden, um "Platz" für die lineare Streckung zu bekommen.

Die Histogrammeinebnung und insbesondere die lineare Streckung sind bei der Verarbeitung von digitalen Satellitenbildern besonders wichtig. Der Dynamikbereich des Sensors muß nämlich so ausgelegt sein, daß er die - sehr unterschiedliche - Strahlung während eines gesamten Erdumlaufes differenzieren kann. Innerhalb einer Satellitenbildszene enthält deshalb nur ein kleiner Grauwertbereich relevante Informationen. Außerdem ist zur Histogrammeinebnung und zur linearen Streckung noch zu vermerken, daß dadurch die eventuell vorher durchgeführte radiometrische Rektifizierung (6.5) wieder verlorengehen kann. Schließlich soll noch zur Histogrammeinebnung ergänzt werden, daß das SOLL-Histogramm (Bild 6.6-4) keine Gleichverteilung sein muß, sondern z.B. auch eine Normalverteilung sein kann, die dem menschlichen Sehen besser angepaßt ist. Die mittleren Grauwerte können nämlich vom menschlichen Auge besser differenziert werden.

Aufgabe 6.6-1: Wie sind die Formeln (6.6-2) bis (6.6-4) abzuwandeln, damit das Histogramm des bearbeiteten Bildes  $\bar{G}$  etwa normal verteilt ist?

Aufgabe 6.6-2: Man konstruiere die (kontinuierliche) Übertragungsfunktion für eine Histogrammeinebnung, wenn die im Bild 6.6-4 angegebene Häufigkeitsverteilung vorliegt.

Aufgabe 6.6-3: Wie wird man eine lineare Streckung eines Multispektralbildes vornehmen, wenn es darum geht, die Verhältnisse der Grauwerte zwischen den einzelnen Spektralbereichen nicht zu verzerren.

## 6.6.2 Äquidensiten

Mit einer treppenförmigen Übertragungsfunktion (Bild 6.6-8) werden Grauwertintervalle zu einem einzigen Grauwert zusammengefaßt. Man spricht von Äquidensiten (density slicing).

Äquidensiten können dazu dienen, die mehr oder weniger großen Abweichungen innerhalb der Grauwerte einer Objektklasse (z.B. von Landnutzungsarten) zu einem Grauwert zusammenzufassen. Die Schwierigkeit bei einer solchen Klassifizierung liegt in der Festsetzung der Schwellenwerte  $s_j$ . In der Praxis

liefert eine Klassifizierung mit treppenförmigen Übertragungsfunktionen - man spricht auch von Schwellenwertoperationen - sehr selten befriedigende Ergebnisse (siehe 6.8.1).

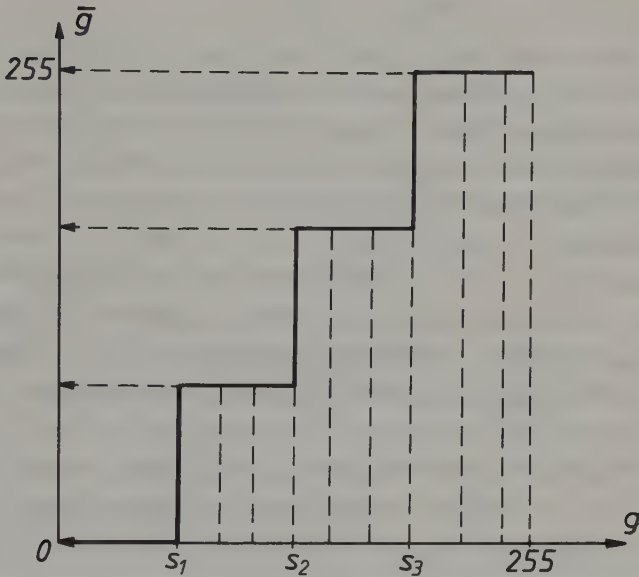


Bild 6.6-8: Übertragungsfunktion für die Äquidensiten

Äquidensiten werden vor allem zur Wiedergabe von digitalen Bildern benutzt. Das Bild 6.6-7 ist eine solche Wiedergabe. Die im Computer tatsächlich vorhandenen 256 Grauwertstufen wurden auf 13 unterschiedliche Grauwertstufen reduziert. Bei einer Reduktion auf zwei Grauwertstufen spricht man von einem Binärbild.

Das menschliche Auge kann maximal etwa 13 Grauwerte in einem Bild eindeutig voneinander unterscheiden. (Bei unmittelbar benachbarten Flächen können auch noch kleinere Grauwertdifferenzen wahrgenommen werden.) Ist eine größere Differenzierung notwendig, ist auf die folgende Farbcodierung überzugehen.

### 6.6.3 Farbkodierung

#### Allgemeine Bemerkungen:

Unter Farbkodierung versteht man die farbige Darstellung eines einkanaligen Bildes. Ein wichtiger Anwendungsbereich ist die Darstellung thematischer Bilder, wie sie z.B. als Ergebnis einer multispektralen Klassifikation (siehe Abschnitt 6.8) vorliegen.

Die farbige Darstellung hat gegenüber der schwarzweißen Darstellung den Vorteil der besseren Erkennbarkeit von Unterschieden in den Bildern. Das Auge kann, wie bereits erwähnt, nämlich wesentlich mehr Farbnuancen als Grauwerte eindeutig unterscheiden. Durch Untersuchungen konnte gefunden werden, daß für eine thematische Karte, welche nur mit Hilfe von Grautönen und ohne Flächenmuster aufgebaut wird, bloß - wie bereits erwähnt - 13 verschiedene Grauwertstufen unterscheidbar sind. Nur in diesem Fall ist das Auge imstande, auch weit voneinander entfernt liegende Flächen gleichen Grautons als gleichwertig einzustufen (Schoppmeyer, 1978). Durch farbige Darstellung können wesentlich mehr eindeutig unterscheidbare Kodierungen vorgenommen werden. Dazu kommt noch, daß durch die Art der Farbe sofort eine Assoziation zu der darzustellenden thematischen Information gegeben werden kann (z.B. Einfärbung eines Klassifizierungsergebnisses so, daß Nadelwald dunkelgrün, Laubwald hellgrün, Gewässer blau etc. erscheinen.)

Diese eben angedeutete psychologische Wirkung der Farben nützt man auch bei der Farbkodierung einkanaliger Halbtonbilder aus. Ein typisches Beispiel ist die Kodierung von Thermalaufnahmen. Thermalaufnahmen sind von Natur aus nicht sehr kontrastreich und erscheinen unscharf. Die Schwarzweißdarstellung (z.B. Bild 3.2-22 und 4.2-16) ist sehr unattraktiv und vermittelt nur einen schlechten Eindruck über die thermischen Verhältnisse. Man erreicht aber sehr aussagekräftige Bilder, die selbst von Ungeübten leicht interpretiert werden können, wenn man eine Farbkodierung durchführt. Dabei werden den "kalten" Bildteilen (tiefe Temperatur heißt geringe Strahlungsintensität, d. h. wiederum niedrige Grauwerte) kalte, d.h. blautonige Farben, und den "heißen" Bildteilen (entsprechen den hohen Grauwerten) warme, d.h. rottonige Farben zugeordnet. (In diesem Fall ist die Farbkodierung gleichzusetzen mit einer farbigen Äquidensitendarstellung (6.6.2).)



Eine andere Farbzuordnung wird sehr oft bei der Darstellung von digitalen Geländemodellen (5.1.4.4) verwendet, wenn den einzelnen Bildelementen die Höhenwerte des Geländes als Grauwerte zugeordnet werden. Eine Schwarzweißdarstellung eines solchen Bildes ergibt unscharfe Wolken, wobei die dunklen Bildteile die Täler und die hellen die Gipfelregionen darstellen. Von den Schulatlanten her ist man gewohnt, daß die Höhenstufen beginnend mit dunkelgrünen Tönen (für die tiefen Tallagen) über gelbe, hellbraune und dunkelbraune Töne (für die Bergregionen) dargestellt werden. Diese atlantenmäßige Darstellung ist nicht unbedingt logisch und wird auch von vielen kritisiert. Sie ist aber für die meisten Menschen zur Gewohnheit geworden und kann somit leicht interpretiert werden. Will man also Höhenstufen darstellen, so ist diese Art der Farbkodierung sehr gebräuchlich.

#### Praktische Durchführung einer Kodierung:

Die Farbkodierung erfolgt, wie die Kontrastoperationen und Äquidensitendarstellung, mit Hilfe von Übertragungsfunktionen. Dieselben Bilddaten werden über drei verschiedene Übertragungsfunktionen abgebildet. Man erhält drei Farbauszüge, die den drei Farbkämen eines Bildausgabesystems zuzuordnen sind. Um diesen Vorgang zu verdeutlichen, sollen zunächst einfache Fälle von Farbkodierungen besprochen werden.

Angenommen wird als Bildausgabemedium ein RGB-Farbbildschirm. Die Grauwerte  $g = 0(1)255$  eines einkanaligen Bildes müssen dann über drei verschiedene Übertragungsfunktionen dem R-, dem G- und dem B-Kanal des Monitors zugeordnet werden. Zunächst soll dieses Bild so farbkodiert werden, daß der gesamte Grauwertebereich in die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau aufgeteilt und dargestellt wird. Die notwendigen Übertragungsfunktionen entsprechen damit drei Schwellwertoperationen, wie sie bereits bei der Äquidensitendarstellung Verwendung fanden. Nehmen wir an, daß ein darzustellendes Bild thermale Strahlungsinformation enthält. In diesem Fall ist es sinnvoll, das untere Drittel des Grauwertebereiches in Blau, das mittlere in Grün und das obere in Rot darzustellen. Die zu verwendenden Übertragungsfunktionen haben dann folgende Gestalt (Tab. 6.6-9a bzw. Bild 6.6-9b):



für Grundfarbe	Eingabegrauwert $g$	Ausgabegrauwert $\bar{g}$
BLAU	0 bis 84	255
	85 bis 255	0
GRÜN	0 bis 84	0
	85 bis 170	255
	171 bis 255	0
ROT	0 bis 170	0
	171 bis 255	255

Tab. 6.6-9a: Dreistufige Farbkodierung

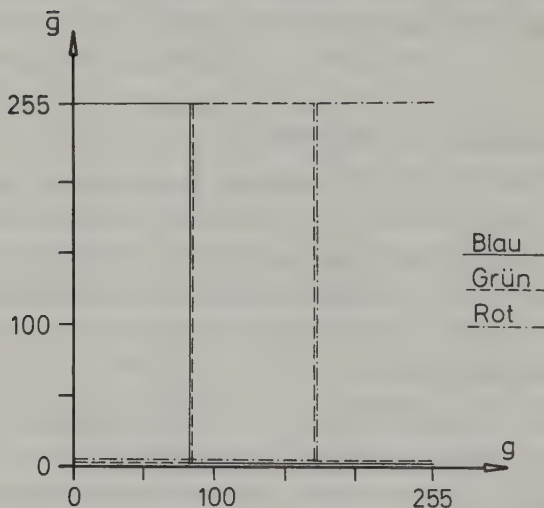


Bild 6.6-9b: Graphische Darstellung zu Tab. 6.6-9a

In der Praxis genügt eine Farbkodierung mit den drei Grundfarben im allgemeinen nicht. Durch überlappende Schwellenwertbildung können auch Mischfarben gebildet werden. Im folgenden ist eine fünfstufige Kodierung angegeben (Tab. 6.6-10a bzw. Bild 6.6-10b). In der Farbskala sind neben den Grundfarben Blau, Grün und Rot auch die Mischfarben Cyan und Gelb vorhanden.

für Grundfarbe	Eingabegrauwert $g$	Ausgabegrauwert $\bar{g}$
BLAU	0 bis 101	255
	102 bis 255	0
GRÜN	0 bis 51	0
	52 bis 204	255
	205 bis 255	0
ROT	0 bis 152	0
	153 bis 255	255

Tab. 6.6-10a: Fünfstufige Farbkodierung

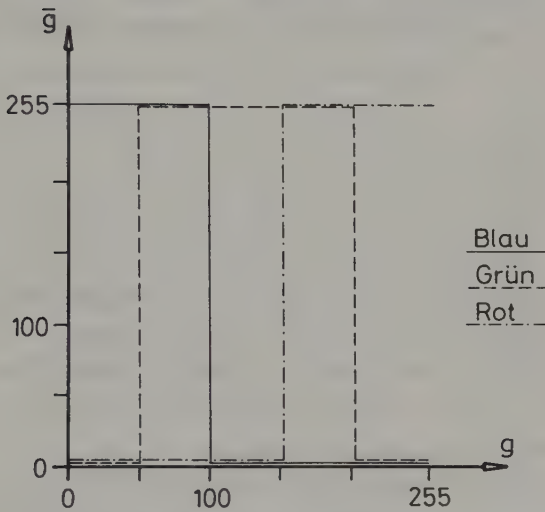


Bild 6.6-10b: Graphische Darstellung zu Tab. 6.6-10a

Verwendet man keine Schwellwertoperationen sondern lineare Übergänge in den Übertragungsfunktionen, so erreicht man kontinuierliche Farbübergänge. Wie man die Übertragungsfunktionen in den jeweiligen Anwendungsbereichen gestaltet, soll hier nicht näher behandelt werden. Die oben erwähnten Farbkodierungen von Thermalaufnahmen oder von Geländehöhen wird man im allgemeinen mit kontinuierlicher Kodierung durchführen. Ein Beispiel für eine kontinuierliche Farbkodierung, in der 256 verschiedene Farben von Blau über Cyan, Grün, Gelb und Rot definiert sind, zeigt folgende Tabelle 6.6-11a bzw. das Bild 6.6-11b:

für Grundfarbe	Eingabegrauwert $g$	Ausgabegrauwert $\bar{g}$
BLAU	0 bis 63	255
	63 bis 128	255 bis 0 linear
	128 bis 255	0
GRÜN	0 bis 63	0 bis 255 linear
	63 bis 192	255
	192 bis 255	255 bis 0 linear
ROT	0 bis 127	0
	127 bis 192	0 bis 255 linear
	192 bis 255	255

Tab. 6.6-11a: Kontinuierliche (256-stufige) Farbkodierung

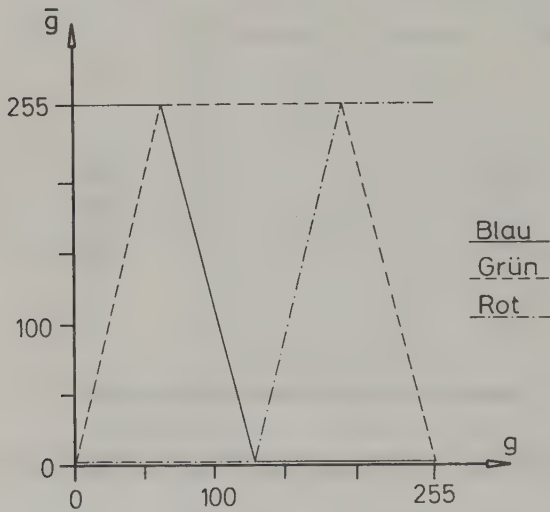


Bild 6.6-11b: Graphische Darstellung zu Tab. 6.6-11a

Will man thematische Bilder mit flächenhaft angeordneten Klassen farbkodieren, so sind die Übertragungsfunktionen für jeden Grauwert getrennt festzulegen, da in diesem Fall ein Grauwert für eine Klassennummer steht. Ein stetiger Verlauf der Funktionen auch über kleine Bereiche ist i.a. nicht erwünscht. Es geht bei diesen thematischen Bildern um eine für das Auge sehr gut unterscheidbare Farbgebung mit assoziierendem Charakter. Die Aufstellung der Übertragungsfunktionen erfolgt am besten mit Hilfe von Farbtafeln. Die Farbtafeln müssen auf ein bestimmtes Farbwiedergabesystem abgestimmt sein und entstehen meist durch Schnitte durch den Farbwürfel (siehe Kapitel 6.1.1). Man kann anhand solcher Tafeln sofort die Farbkomponenten

für die gewünschte Farbe ablesen. Sind keine Farbtafeln vorhanden und hat der Benutzer wenig Erfahrung mit der Farbzusammensetzung aus drei Grundfarbkomponenten, dann kann man eine gute Näherung durch Angabe der IHS-Komponenten, die mit Hilfe bekannter Formeln in RGB-Komponenten umgerechnet werden, erreichen (6.1.1.3).

#### Abschließende Bemerkungen:

Obwohl die Farbkodierung ein sehr einfaches Bildverarbeitungsverfahren darstellt, hat sie besondere Bedeutung. Will man attraktive und aussagekräftige Ergebnisse erhalten, so muß sie auch sorgfältig durchgeführt werden. Die Erkenntnisse der Farbenlehre spielen hier eine besondere Rolle. Will man ein farbkodiertes Bild auf verschiedenen Ausgabemedien darstellen, z.B. auf Bildschirm, auf Farbfilm und im Druck, so können nicht die gleichen Übertragungsfunktionen verwendet werden. Die Übertragungsfunktionen sind auf das jeweilige Ausgabemedium abzustimmen. Es ist zu beachten, daß die reine Grundfarbe Blau auf Farbmonitoren nur schlecht erkennbar ist, besonders wenn sie nur in kleinen Flächen auftritt. Diese Farbe ist daher zu vermeiden. Blaue Farbtöne sind daher am besten als Mischfarben zu erzeugen, z.B. durch Hinzumischen von Grünanteilen, sodaß ein Cyanton entsteht. Ebenso zu vermeiden sind Helligkeitsstufungen im blauen Bereich. Wie aus den Empfindlichkeitskurven des menschlichen Auges (Band 1, Anhang 2.3-1 und Kapitel 6.1.1) zu ersehen ist, ist die Helligkeitsempfindlichkeit im blauen Bereich besonders schwach. Relativ starke Intensitätsschwankungen der blauen Farbkurve des Monitors bewirken nur geringe Helligkeitsschwankungen.

Bei der Erstellung von Übertragungsfunktionen für kontinuierliche Farbübergänge ist zu bedenken, daß ideal gleichabständig konstruierte Funktionen nicht unbedingt farblich gute Ergebnisse liefern. Die erreichbaren Farben hängen sehr von den Farbörtern der Grundfarben des verwendeten Farbwiedergabesystems ab (siehe Kapitel 6.1.1). Wie aus dem Normfarbdiagramm (Bild 6.1-13a) zu ersehen ist, sind die Farbabstände der Mischfarben, je nach Lage im Diagramm, stark unterschiedlich. Während im roten und im blauen Bereich durch leichte Änderung der Mischungsverhältnisse bereits unterscheidbare Farben erzeugt werden können, ist dieser Effekt im grünen Bereich nicht zu finden. Es gibt dort eine große Anzahl von Mischungen, die das Auge als gleiches Grün erkennt. Bei der Aufstellung der Übertragungsfunktion für den Grünbereich ist diese Erscheinung zu berücksichtigen.

Schließlich spielt auch die psychologische Wirkung der Farben eine wesentliche Rolle. Ein leuchtendes Rot wird immer als Warnung empfunden. Rote Flächen erscheinen auch vom Auge weniger entfernt zu sein als andere Flächen. Grüne Flächen dagegen wirken angenehm und entfernt. Bei Farbkodierungen entsteht daher manchmal ein dreidimensionaler Eindruck.

Abschließend sei noch darauf hingewiesen, daß die Farbkodierung heutzutage nicht nur in der Bildverarbeitung angewendet wird, sondern daß sie ganz allgemein in der EDV besondere Bedeutung erlangt hat. Durch den steigenden Einsatz von Farbmonitoren für die graphische Datenverarbeitung, aber auch für rein alphanumerische Zwecke, erhält das Erstellen von Übertragungstabellen (Look-up-Tabellen (6.6.1) oder kurz LUTs) für Farbkodierung weite Verbreitung (Murch, 1985).

Aufgabe 6.6-4: Auf einem RGB-Monitor soll ein in Form eines digitalen Bildes vorliegender Datensatz eines digitalen Geländemodellles dargestellt werden. Eine Farbkodierung mit kontinuierlichem Verlauf soll so durchgeführt werden, daß eine Darstellung erhalten wird, die der in Schulatlanten üblichen ähnlich ist. Niedrige Grauwerte sollen dunkelgrün und hohe Grauwerte bräunlich dargestellt werden. Man überlege sich für eine solche Darstellung geeignete Übertragungstabellen. (Hinweis: Eine braune Farbe entspricht einem dunklen Gelb, eventuell mit leichtem Rotanteil).

(Beispiel einer Lösung: BLAU: (0 bis 255) -> 0; GRÜN: (0 bis 64) -> (128 bis 255), (64 bis 192) -> (255 bis 192), (192 bis 255) -> (192 bis 64); ROT: (0 bis 63) -> 0; (64 bis 192) -> (0 bis 192); (192 bis 255) -> (192 bis 128))



#### 6.6.4 Differenzieren von Bildern

Bisher wurde jedes Bildelement unabhängig von seinen (örtlich) benachbarten Bildelementen betrachtet. In diesem Abschnitt und insbesondere im Abschnitt 6.7 spielt die örtliche Nachbarschaft der Bildelemente die entscheidende Rolle. Eine Einführung in diese Bildverarbeitungsoperationen ist das Differenzieren von Bildern.

Die Wirkungsweise der 1. und 2. Ableitung kann sehr gut veranschaulicht werden, wenn wir zunächst den eindimensionalen Fall betrachten und einen kontinuierlichen Verlauf des Grauwertes  $g$  in Abhängigkeit der Koordinate  $x$ , also  $g(x)$ , annehmen (Bild 6.6-12). Die 1. Ableitung liefert ein Bild, bei dem die Bereiche des Originals mit gleichen (von Bereich zu Bereich aber unterschiedlichen) Grauwerten den neuen Grauwert  $g'(x) = 0$  erhalten. (Diese "Nulllinie" wird bei der Bildausgabe angehoben, damit keine negativen Grauwerte auftreten.) An den stetigen Übergängen von einem zum anderen Grauwertniveau (Plateau) des Originals entstehen relevante Bildinformationen.

An Sprungstellen im Original, insbesondere bei Punkten (spikes) und Linien (lines), wird die 1. Ableitung plus bzw. minus Unendlich. Punkte und Linien des Originals sind an den Nullstellen der 1. Ableitung zu finden; die "Breite" einer solchen Nullstelle gibt die Linienbreite bzw. Punktgröße an (Bild 6.6-12).

Die 2. Ableitung  $g''(x)$  liefert besonders interessante Informationen an den stetigen Übergängen der Grauwerte des Originals: Sogenannte Rampen (ramps), also der linear sich verändernde Übergang der Grauwerte von einem Plateau zum anderen, sind an den Nullstellen der 2. Ableitung zu finden; die "Breite" einer solchen Nullstelle gibt die Breite der jeweiligen Rampe an. Von besonderer Wichtigkeit sind die Kanten (edges). Eine Kante ist die Übergangszone zwischen einer Rampe und einem Plateau oder zwischen zwei Rampen. Ist die Kante im Original scharf, dann ist die 2. Ableitung  $g''(x)$  schmal und groß; unscharfe Kanten haben eine größere Breite und kleinere Werte  $g''(x)$ . Die 2. Ableitung liefert uns eine Kantenextraktion (Bild 6.6-12).

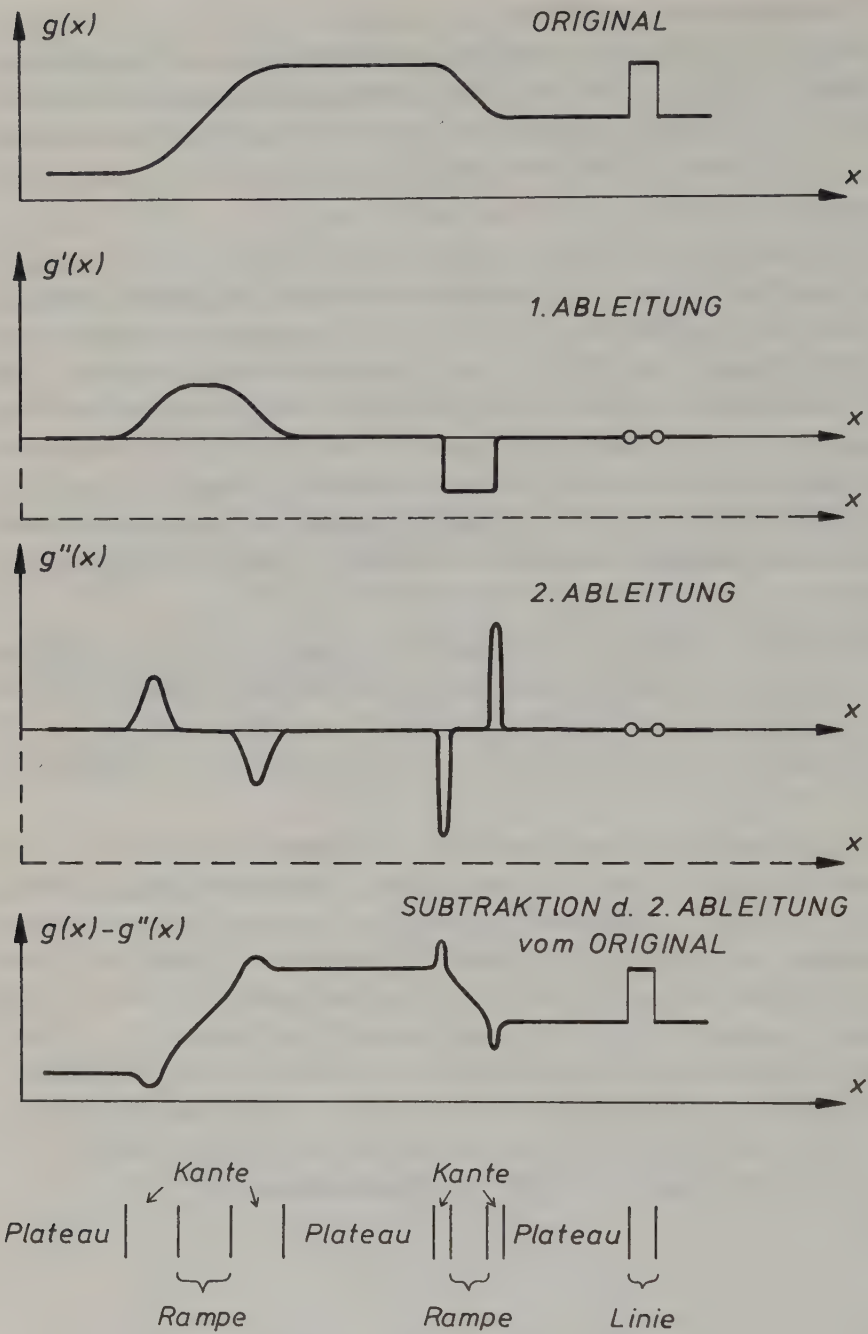


Bild 6.6-12: Differentialoperationen

Subtrahiert man die - entsprechend skalierte - 2. Ableitung  $g''(x)$  vom Original  $g(x)$ , so erhält man ein Bild, in dem die Übergangszonen zwischen den verschiedenen Grauwertbereichen des Originales verstärkt werden. Man spricht deshalb von einer Kantenverstärkung (Bild 6.6-12).

Betrachten wir nun ein zweidimensionales digitales Bild  $G$  mit den Bildelementen  $g_{i,j}$ , so erhält man die 1. Ableitung in  $x$ -Richtung aus

$$g'_{i,j}{}^x = g_{i+1,j} - g_{i,j} \quad (6.6-5)$$

und in  $y$ -Richtung aus

$$g'_{i,j}{}^y = g_{i,j+1} - g_{i,j} \quad (6.6-6)$$

Die Bildelementgrößen  $\Delta x$  bzw.  $\Delta y$ , die bei der Berechnung der 1. Ableitung zu beachten wären, blieben in diesen Gleichungen unberücksichtigt, denn sie spielen in der digitalen Bildverarbeitung keine Rolle. Anstelle von "Ableitung" spricht man deshalb auch treffender von "Differenzenoperator". Das Bild 6.6-14 ist die 1. Differenz sowohl in  $x$ - als auch in  $y$ -Richtung, ermittelt aus dem Originalbild 6.6-13. Es wurde also folgender Differenzenoperator angewandt:

$$\boxed{g'_{i,j} = g'_{i,j}{}^x + g'_{i,j}{}^y = g_{i+1,j} + g_{i,j+1} - 2 g_{i,j}} \quad (6.6-7)$$

Vor der Bildausgabe mußten die Grauwerte der Bildmatrix  $G'$  angehoben und auf den Dynamikbereich 0...255 gebracht werden.

Anmerkung: Da  $g(x,y)$  eine Funktion der Variablen  $x$  und  $y$  ist, sind  $g'{}^x$  und  $g'{}^y$  die Komponenten des Gradienten, d.h.  $\text{grad} = (g'{}^x, g'{}^y)^T$ . Ein Bild, in dem man den Betrag bzw. das Quadrat des Betrages des Gradienten darstellt, hat deshalb in Bereichen mit stark variierenden Grauwerten  $g$  große Werte  $\bar{g}' = (g'{}^x)^2 + (g'{}^y)^2$ . Der Quotient  $g'{}^y/g'{}^x$  liefert uns die Richtung des Gradienten in der  $xy$ -Ebene. Da im Originalbild eine Linie an dieser Stelle senkrecht zu dieser Richtung verläuft, kann diese Information für eine computergestützte Linienverfolgung genutzt werden.

Ausgehend von der Beziehung (6.6-7) können wir auch die 2. Ableitung bzw. 2. Differenz bilden:

$$g''_{i,j} = g''_{i,j}{}^x + g''_{i,j}{}^y = (g'_{i,j}{}^x - g'_{i-1,j}{}^x) + (g'_{i,j}{}^y - g'_{i,j-1}{}^y) \quad (6.6-8)$$

(6.6-5) und (6.6-6) in (6.6-8):

$$g_{i,j}'' = g_{i+1,j} - g_{i,j} - g_{i,j} + g_{i-1,j} \\ + g_{i,j+1} - g_{i,j} - g_{i,j} + g_{i,j-1}$$

$$g_{i,j}'' = g_{i+1,j} + g_{i-1,j} + g_{i,j+1} + g_{i,j-1} - 4 g_{i,j} \quad (6.6-9)$$

Der Differenzenoperator (6.6-9) wird als Laplace-Operator bezeichnet.

Anmerkung: Die bei der 2. Ableitung einer Funktion mit zwei Veränderlichen auftretenden gemischten Glieder, also  $g',xy$  werden beim Laplace-Operator nicht berücksichtigt.

Bild 6.6-15 erhält man, wenn man auf das Bild 6.6-13 den Laplace-Operator (6.6-9) anwendet. Anschließend wurden mit einem einzigen Schwellenwert eine Trennung in "Schwarz und Weiß" durchgeführt. Dieses mit dem Laplace-Operator erzeugte Binärbild zeigt die Kanten bzw. die Konturen eines Bildes, und zwar unabhängig von der Richtung der Kanten. Die Breite der weißen Linien(-Bänder) ist ein Maß für die Schärfe der Kanten im Original.

Die Subtraktion der 2. Differenzen  $\underline{G}''$  vom Originalbild  $\underline{G}$  liefert ein Bild, in dem die Kanten verstärkt sind (Bild 6.6-16). Das kombinierte Bild aus  $\underline{G}$  und  $\underline{G}''$  vermittelt den Eindruck besserer Schärfe: Die Kanten sind verstärkt. Man kann im Sinne der Filtertechnik, die wir im folgenden Abschnitt näher behandeln, auch sagen, daß die Kontraste an den hochfrequenten Bildstellen verstärkt wurden.



*Bild 6.6-13: Originalbild (Nowak, 1978)*

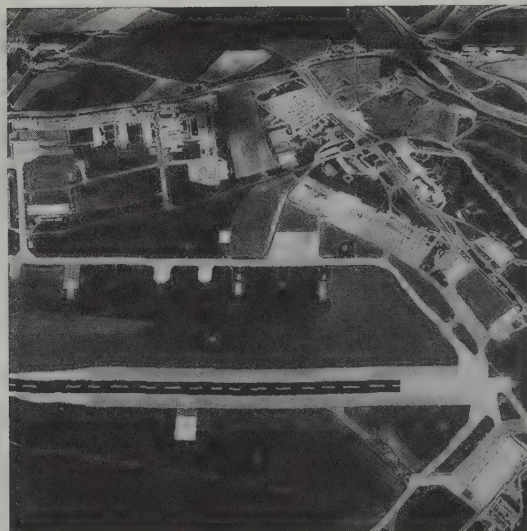


*Bild 6.6-14: Differenzenoperator in x- und y-Richtung  
angewandt auf das Bild 6.6-13 (Nowak, 1978)*





*Bild 6.6-15: Laplace-Operator angewandt auf das Bild 6.6-13  
(Nowak, 1978)*



*Bild 6.6-16: 2. Differenzen (Bild 6.6-15) subtrahiert vom  
Original (Bild 6.6-13) (Nowak, 1978)*

## 6.7 Filterung

Bei einer Filterung geht es darum, Erwünschtes von Unerwünschtem zu trennen. \*Unerwünschte Information sind z.B. Bildstörungen, die durch Übertragungsfehler oder fehlerhafte Sensorreaktionen entstehen. Hat die unerwünschte Information in erster Linie zufälligen Charakter, so spricht man auch vom Rauschen. Die Filtertechnik wird aber auch eingesetzt, um schwach ausgeprägte Bildinformationen, die für den Benutzer wichtig sind, zu verstärken.

Wir besprechen zuerst die Filterung im sogenannten Ortsbereich (6.7.1). Sie steht im Gegensatz zur Filterung im Frequenzbereich (6.7.3), die eine Spektralanalyse des Bildes (6.7.2) voraussetzt. Der Zusammenhang der Filterung im Orts- und im Frequenzbereich wird im Abschnitt 6.7.4 hergestellt. Den Abschluß des Kapitels über Filterung bilden die Methoden für den Filterentwurf (6.7.5). Die Filterung wird anhand einkanaliger Bilder, also von Schwarzweißbildern, betrachtet.

### 6.7.1 Filterung im Ortsbereich

Eine sehr einfache Filterung ist die gleitende Mittelwertbildung. In diesem Fall entstehen die Bildelemente  $\bar{g}_{ij}$  der neuen Bildmatrix  $\bar{G}$  aus den Bildelementen  $g_{ij}$  der ursprünglichen Matrix  $G$  durch eine Mittelung. Man kann sie wie folgt formulieren:

$$\bar{g}_{ij} = \frac{1}{(2n+1)^2} \sum_{k=-n}^n \sum_{l=-n}^n g_{i+k, j+l} \quad n \geq 1 \quad (6.7-1)$$

Zahlenbeispiel für  $n = 1$ : Gegeben ist die Matrix  $G$  (Bild 6.7-1 links). Daraus erhält man unter Verwendung der Gleichung (6.7-1) z.B. das Bildelement  $\bar{g}_{22}$ :

$$\bar{g}_{22} = \frac{1}{9} (10+14+2+11+13+10+9+25+8) = 11$$

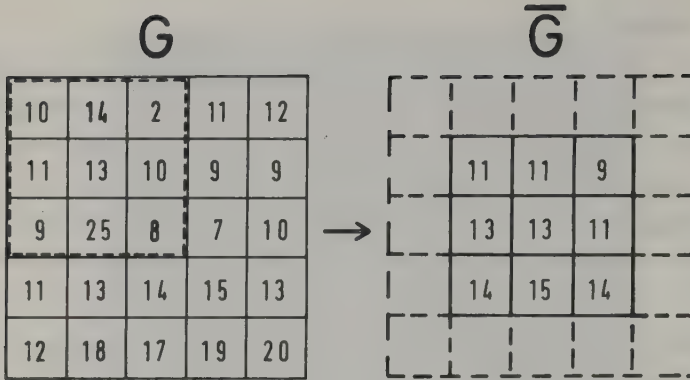


Bild 6.7-1: Gleitende Mittelwertbildung

Aufgabe 6.7-1: Man überlege, wie man bei der gleitenden Mittelwertbildung von der Position  $\bar{g}_{ij}$  zur Position  $\bar{g}_{i+1,j}$  Rechenzeiten einsparen kann, insbesondere wenn  $n$  verhältnismäßig groß ist.

Mittels einer Filtermatrix  $\underline{W}$  mit den Indizierungen  $i = 1(1)(2n+1)$  und  $j = 1(1)(2n+1)$  läßt sich die Gleichung (6.7-1) noch anders anschreiben:

$$\bar{g}_{ij} = \sum_{k=-n}^n \sum_{l=-n}^n g_{i-k, j-l} \cdot w_{n+1+k, n+1+l} \quad (6.7-2)$$

Die Gleichung (6.7-2) beschreibt eine Operation, die als Faltung bezeichnet wird. Man schreibt vereinfacht:

$$\bar{\underline{G}} = \underline{G} * \underline{W} \quad (6.7-3)$$

Die Filtermatrix  $\underline{W}$  lautet für das eingeführte Zahlenbeispiel:

$$\underline{W} = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} \\ w_{31} & w_{32} & w_{33} \end{pmatrix} = \frac{1}{9} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.7-4)$$

Anmerkung: Die negativen Vorzeichen vor  $k$  und  $l$  in der Gleichung (6.7-2) bewirken gegenläufige Richtungen der Indizes in der Filtermatrix  $\underline{W}$  und der Bildmatrix  $\underline{G}$ , was bei der Filtermatrix der gleitenden Mittelwertbildung aber keine Rolle spielt.

Eine Filterung mit einem gleitenden Mittel ergibt - wie wir in einem ande-

ren Zusammenhang im Abschnitt 3.2.1.2<sup>1</sup> bereits kennengelernt haben - eine Dämpfung hochfrequenten Rauschens. Dabei werden allerdings auch die hochfrequenten Bildanteile gedämpft, weshalb dieser Bildverarbeitungsalgorithmus in der Praxis keine große Rolle spielt.

Eine größere Bedeutung hat dagegen die Filterung mit folgender Matrix:

$$\underline{W} = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.7-5)$$

In diesem Fall wird das neue Bildelement  $\bar{g}_{ij}$  aus den acht benachbarten Bildelementen durch Mittelung berechnet. Man ersetzt das ursprüngliche Bildelement  $g_{ij}$  aber nur dann durch das neue Bildelement  $\bar{g}_{ij}$ , wenn die Differenz größer als ein vorgegebener Schwellenwert ist. Auf diese Weise können punktförmige Bildstörungen, sogenannte Spikes, eliminiert werden, ohne den übrigen Bildinhalt zu verändern. (Genau genommen kann man hier nicht mehr von einer Filterung mit einer reinen Faltung sprechen.)

Dieses Verfahren kann man auch auf die Elimination zeilenförmiger Bildstörungen anwenden, wenn man folgende Filtermatrix benutzt:

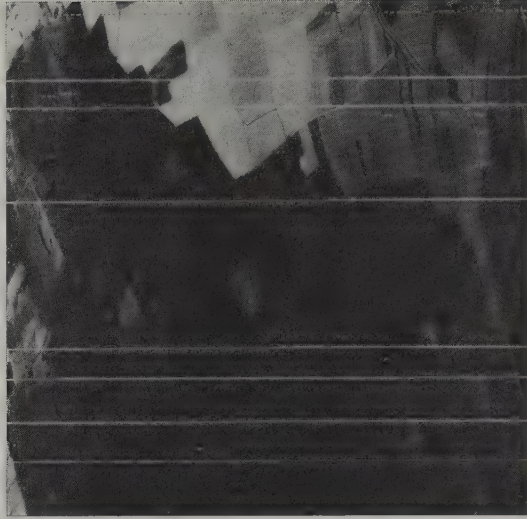
$$\underline{W} = \frac{1}{6} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.7-6)$$

Bild 6.7-2 ist ein punkt- und zeilenförmig gestörtes Bild. Nach Filterung mit der Matrix (6.7-6) mit einem Schwellenwert von 40 bei insgesamt 256 Grauwertstufen ergibt sich das Bild 6.7-3. Alle Störungen konnten eliminiert werden. An Kanten, an die stark unterschiedliche Grauwerte angrenzen, ist aber eine gewisse Unschärfe ins Bild gekommen.

Zur Elimination zeilenförmiger Bildstörungen wurden auch spezielle Regressionsfilter entwickelt (Ehlers, 1984).

<sup>1</sup> Die dort angegebene Beziehung (3.2-10) für die gleitende Mittelwertbildung kann übrigens auch als Faltung formuliert werden. An die Stelle einer Filtermatrix tritt in diesem Fall eine kontinuierliche Filterfunktion. Mit den dort eingeführten Bezeichnungen lautet die Faltung: Die Funktion  $L(Y)$  ist mit einer rechteckigen Filterfunktion, die über die Breite  $\Delta Y$  den Funktionswert  $w = 1/\Delta Y$  besitzt, zu falten.





*Bild 6.7-2: Originalbild mit zeilenförmigen Bildstörungen (Nowak, 1978)*



*Bild 6.7-3: Ergebnis der Filterung mit der Filtermatrix (6.7-6) und einem Schwellenwert von 40 (Nowak, 1978)*



An dieser Stelle soll auch die Medianfilterung angesprochen werden. Sie läuft darauf hinaus, daß man alle Bildelemente  $g_{ij}$ , die innerhalb der Filtermatrix liegen, ihrer Größe nach ordnet und dann den in der Mitte stehenden Grauwert als  $\bar{g}_{ij}$  verwendet. Von Modalwertfilterung spricht man, wenn der am häufigsten vorkommende Grauwert als  $\bar{g}_{ij}$  benutzt wird. Bei der Median- und Modalwertfilterung hat das gefilterte Bild nur solche Grauwerte, die bereits im Eingabebild vorhanden waren. Modalwertfilterung wird vor allem bei klassifizierten Bildern (Abschnitt 6.8.8) zur Elimination von Ausreißern herangezogen.

Zum Schluß dieses Abschnittes wird auf die im Abschnitt 6.6.4 erläuterten Differenzenoperatoren nochmals eingegangen. Die 1. Ableitung in x-Richtung (6.6-5) erhält man mit folgender Filtermatrix:

$$\underline{W}_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6.7-7)$$

Die entsprechende Filtermatrix in y-Richtung (6.6-6) lautet:

$$\underline{W}_y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6.7-8)$$

Diese Differenzenoperatoren  $\underline{W}_x$  und  $\underline{W}_y$  sind sehr empfindlich auf (kleine) Störungen in den einzelnen Bildelementen. Geht man dagegen auf folgende Differenzenoperatoren

$$\underline{W}_x = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \underline{W}_y = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (6.7-9)$$

über, so geschieht simultan mit der Differenzenbildung auch eine Mittelung der Differenzen. Zum Extrahieren von Details und Kanten aus Bildern wird in der Praxis häufig der sogenannte Sobeloperator eingesetzt, der mit den Differenzenoperatoren

$$\underline{W}_x = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} \quad \underline{W}_y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (6.7-10a)$$

beginnt. Diese Differenzenoperatoren mitteln einerseits in Zeilen- bzw. Spaltenrichtung mit starker Betonung des zentralen Elementes und glätten andererseits etwas in Spalten- bzw. Zeilenrichtung, da jeweils die mittlere Zeile bzw. Spalte übersprungen wird. In Fortsetzung des Sobeloperators faßt man die gefalteten Bilder  $\underline{G} * \underline{W}_x$  und  $\underline{G} * \underline{W}_y$  wie folgt zu einem Bild  $\underline{\bar{G}}$  zusammen

(siehe auch 6.6.4):

$$\bar{G} = \sqrt{(\underline{G} * \underline{W}_x)^2 + (\underline{G} * \underline{W}_y)^2} \quad (6.7-10b)$$

Den Laplace-Operator, der ebenfalls auf die Kanten des Bildes ausgelegt ist, haben wir in Form der Gleichung (6.6-9) bereits kennengelernt. Dieser Operator kann aber auch als Faltung (6.7-2) mit folgender Filtermatrix formuliert werden:

$$\underline{W} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (6.7-11)$$

Das kantenverstärkte Bild, das durch Subtraktion der zweiten Differenzen vom Originalbild hervorgeht (Bild 6.6-16), entsteht durch Faltung mit folgender Filtermatrix:

$$\underline{W} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (6.7-12)$$

Anstelle der Matrix (6.7-11) können zum Extrahieren der Grauwertkanten auch folgende und ähnliche Filtermatrizen benutzt werden:

$$\underline{W} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.7-13)$$

Aufgabe 6.7-2: Man überlege sich die Wirkung einer Faltung mit einer Filtermatrix der Bauart (6.7-4), wenn anstelle einer 3x3-Filtermatrix eine 5x5-Filtermatrix verwendet wird. Wie sieht die 5x5-Filtermatrix aus?

Aufgabe 6.7-3: Man entwerfe ein Filter, das die im folgenden Bild angegebenen Bildstörungen eliminiert.

85	85	84	86	84	83	85	84	84	87	87	82	81	88	85
81	79	81	82	80	79	81	77	80	77	81	83	76	83	77
88	87	88	84	87	82	82	85	88	85	88	87	88	83	84
86	81	83	81	83	80	87	80	84	84	80	84	86	83	78
82	83	84	84	81	82	83	81	79	81	255	255	78	83	76
89	87	86	85	84	84	90	87	87	83	87	88	90	87	92
80	82	82	80	86	84	86	80	85	79	79	82	83	80	77
80	88	81	83	81	79	83	82	80	78	83	82	80	83	80
84	86	85	82	87	87	85	86	83	84	87	87	88	83	84
81	80	78	81	82	82	79	78	83	83	79	84	85	84	81
91	88	91	92	93	89	95	96	93	89	94	88	96	95	92
83	82	83	83	84	84	77	83	84	86	85	84	82	81	81
84	83	81	82	85	84	83	83	86	87	84	83	87	88	87
82	85	82	84	81	82	84	83	81	85	84	79	79	84	83
76	75	75	79	76	72	75	74	78	79	79	80	76	79	82
78	80	80	79	78	255	255	80	77	75	77	77	79	80	77
82	76	77	79	75	75	79	76	72	75	78	78	78	76	76
76	76	77	69	71	79	76	77	77	80	79	78	81	77	80
80	87	85	84	85	82	83	83	86	84	82	84	84	87	86
79	76	81	83	78	80	79	80	81	82	83	84	81	79	80
78	78	80	77	80	79	83	83	83	80	80	81	78	83	82

Aufgabe 6.7-4: Man formuliere die 2. Ableitung - getrennt in x- und y-Richtung - als Faltung mit einer Filtermatrix.

Aufgabe 6.7-5: Was bewirkt eine Faltung mit folgenden Filtermatrizen:

$$W = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \quad \underline{W} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

Aufgabe 6.7-6: Wie ist die Filtermatrix (6.7-12) abzuändern, wenn kein zweidimensionales sondern nur ein eindimensionales Bild gefiltert werden soll ? (Lösung siehe Gleichung (6.7-25)).

Aufgabe 6.7-7: Wie ist die Formel (6.7-2) für die Faltung abzuwandeln, wenn keine quadratische sondern eine rechteckige Filtermatrix benutzt werden soll ?

Aufgabe 6.7-8: Man falte das Bild G (Bild 6.7-1) mit den Filtermatrizen (6.7-10) und (6.7-12).

## 6.7.2 Spektralanalyse

Die Grauwerte  $g$  wurden bisher als Funktion der Ortskoordinaten  $X$  und  $Y$  bzw. der Indizes  $i$  und  $j$  dargestellt, d.h.  $g(X,Y)$  bzw.  $g_{ij}$ . Eine im Ortsbereich festgelegte Funktion kann durch eine Fouriertransformation auch in den Frequenzbereich überführt werden. Die inverse Fouriertransformation erlaubt den umgekehrten Weg. Im Frequenzbereich erkennt man die einzelnen Elementarwellen, aus denen ein Bildsignal zusammengesetzt ist. Die Parameter dieser Elementarwellen werden als Spektrum bezeichnet. Wir werden sehen, daß im Frequenzbereich ebenfalls Filterungen vorgenommen werden können. Eine Analyse des Spektrums erlaubt, Filter zu entwerfen und ihre Wirkungsweise zu überwachen.

Zunächst wird der Zusammenhang zwischen Orts- und Frequenzbereich anhand einer eindimensionalen Grauwertfunktion  $g(X)$  veranschaulicht. Wir wählen eine einfache Funktion  $g(X)$ , die sich nur aus den drei Elementarwellen  $g_1(X) = 50 \cdot \sin(2\pi \cdot 0.01 \cdot X)$ ,  $g_2(X) = 16.7 \cdot \sin(2\pi \cdot 0.03 \cdot X)$  und  $g_3(X) = 10 \cdot \sin(2\pi \cdot 0.05 \cdot X)$  zusammensetzt (Bild 6.7-4). Das Spektrum - genauer das Amplitudenspektrum - sind die Amplituden der Elementarwellen, die über den Frequenzen  $f_k = 0.01, 0.03, 0.05$  aufgetragen werden. Die Frequenzen  $f_k$  sind nichts anderes als die Reziprokwerte der Wellenlängen  $l_k$ . Das unterste Schaubild in 6.7-4 soll verdeutlichen, wie ein und dieselbe Funktion sowohl im Orts- als auch im Frequenzbereich definiert ist.

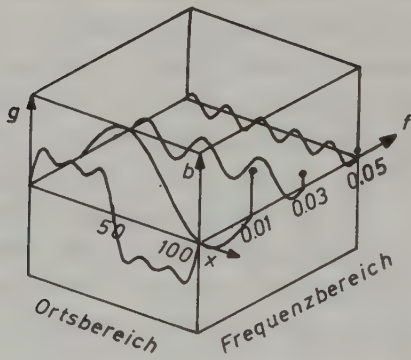
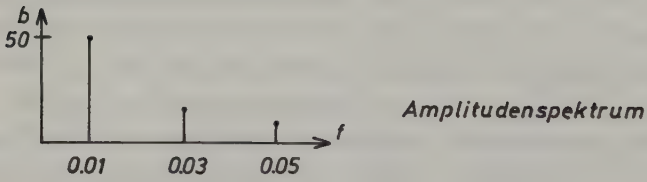
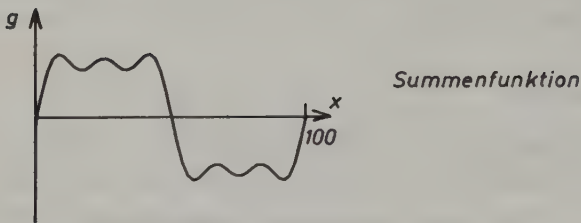
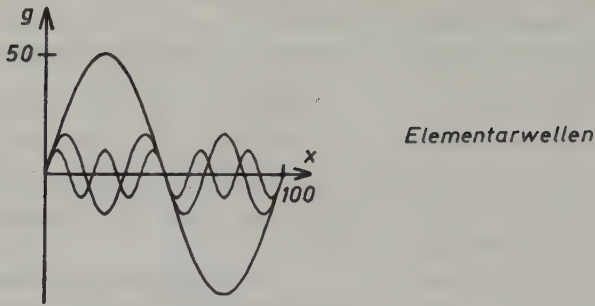


Bild 6.7-4: Zusammenhang von Orts- und Frequenzbereich

In der digitalen Bildverarbeitung - zunächst für ein eindimensionales Bild - besteht die Grauwertfunktion  $g(X)$  aus diskreten Bildpunkten  $g_i$  mit einem Digitalisierungsintervall  $\Delta X$  (Bild 6.7-5).

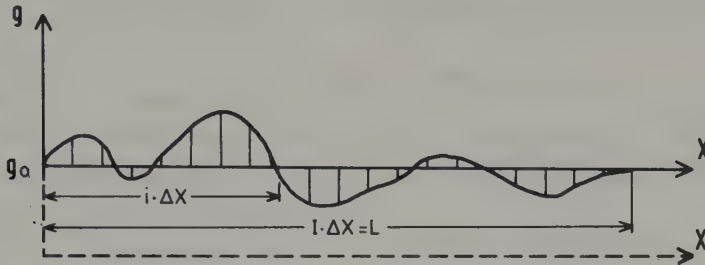


Bild 6.7-5: Bildpunkte einer stetigen Grauwertfunktion

Dabei muß  $\Delta X$  dem Abtasttheorem (C 3-94) genügen:

$$\Delta X < \frac{l_{\min}}{2} = \frac{1}{2f_{\max}} \quad (6.7-14)$$

Das bedeutet, daß die Bildpunkte  $g_i$  einen Abstand  $\Delta X$  haben müssen, der kleiner ist als die halbe Wellenlänge  $l_{\min}$  der relevanten Bildinformation.<sup>1</sup>

Die Grauwerte  $g_i$ , die vorher um einen mittleren Grauwert  $g_0$  (Bild 6.7-5) reduziert werden, sollen sich aus  $m$  Elementarwellen, deren Wellenlängen  $l_k = 1/f_k$  aus der Division der Bildlänge  $L$  durch die natürlichen Zahlen  $k$  hergehen, zusammensetzen (siehe auch Gleichung (3.2-6)):

$$g_i = \sum_{k=1}^m (a_k \cdot \cos(2\pi \cdot f_k \cdot i \cdot \Delta X) + b_k \cdot \sin(2\pi \cdot f_k \cdot i \cdot \Delta X)) \quad \begin{matrix} f_k = 1/l_k = k/L \\ k = 1(1)m \\ i = 1(1)I \end{matrix} \quad (6.7-15)$$

Die Koeffizienten  $a_k, b_k$  des Spektrums erhält man aus den Gleichungen (C 3.4.2.1):

$$a_k = \frac{2}{I} \sum_{i=1}^I g_i \cdot \cos(2\pi \cdot f_k \cdot i \cdot \Delta X) \quad b_k = \frac{2}{I} \sum_{i=1}^I g_i \cdot \sin(2\pi \cdot f_k \cdot i \cdot \Delta X) \quad (6.7-16)$$

<sup>1</sup> Ist die Bedingung (6.7-14) nicht eingehalten, dann kommt es zu Verflechtungseffekten (aliasing), die u.a. bewirken, daß aus dem Spektrum das Bildsignal nicht mehr fehlerfrei in den Ortsbereich transformiert werden kann.



Die Gleichung (6.7-16) ist die Fouriertransformation und die Gleichung (6.7-15) die inverse Fouriertransformation. (In der Fachliteratur werden diese Transformationen bevorzugt in der komplexen Zahlenebene formuliert. Siehe Anhang 6.7-1.) Die Gleichung (6.7-15) kann man noch wie folgt umschreiben (siehe Gleichung (3.2-6) bis (3.2-9)):

$$g_i = \sum_{k=1}^m c_k \cdot \cos(2\pi \cdot f_k \cdot i \cdot \Delta X - \phi_k), \quad (6.7-17)$$

$$\text{wobei } c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (6.7-18)$$

$$\phi_k = \arctan(b_k/a_k) \quad (6.7-19)$$

Die Gesamtheit der Amplituden  $c_k$  wird als Amplitudenspektrum und die Gesamtheit der Quadrate  $c_k^2$  als Leistungsspektrum bezeichnet. Die Gesamtheit der Phasenwinkel  $\phi_k$  nennt man Phasenspektrum.

Zahlenbeispiel: Gegeben sind von dem Bildsignal des Bildes 3.2-9 für ein Digitalisierungsintervall von  $\Delta X = 12.5$  die acht Grauwerte  $g_i$ . Man berechne daraus das Amplitudenspektrum. Zuerst ist zu prüfen, ob das Abtasttheorem (6.7-14) eingehalten ist. Die minimale Wellenlänge  $l_{\min}$  ist in diesem Fall mit 33.3 bekannt. Das Digitalisierungsintervall  $\Delta X$  muß also kleiner  $33.3/2 = 16.6$  gewählt werden. Bei der Digitalisierung mit  $\Delta X = 12.5$  wurde also das Abtasttheorem eingehalten. In der folgenden Tabelle sind in der ersten Spalte die Digitalisierungsstellen, in der zweiten Spalte die Grauwerte  $g_i$ , und zwar bereits reduziert um den konstanten Anteil  $g_0 = 40$ , und in den folgenden Spalten die für die Fouriertransformation (6.7-16) notwendigen Cosinus- und Sinuswerte eingetragen.

$i \cdot \Delta X$	$g_i$	$\cos \frac{2\pi i \Delta X}{100}$	$\sin \frac{2\pi i \Delta X}{100}$	$\cos \frac{2\pi i \Delta X}{50}$	$\sin \frac{2\pi i \Delta X}{50}$	$\cos \frac{2\pi i \Delta X}{33.3}$	$\sin \frac{2\pi i \Delta X}{33.3}$
12.5	12.16	0.707	0.707	0.000	1.000	-0.707	0.707
25.0	7.65	0.000	1.000	-1.000	0.000	0.000	-1.000
37.5	19.35	-0.707	0.707	0.000	-1.000	0.707	0.707
50.0	3.18	-1.000	0.000	1.000	0.000	-1.000	0.000
62.5	-12.16	-0.707	-0.707	0.000	1.000	0.707	-0.707
75.0	-24.19	0.000	-1.000	-1.000	0.000	0.000	1.000
87.5	-19.35	0.707	-0.707	0.000	-1.000	-0.707	-0.707
100.0	13.36	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000

Die Koeffizienten  $a_k, b_k$  des Spektrums aus Gleichung (6.7-16) und das Amplitudenspektrum aus Gleichung (6.7-18) lauten:

$$\begin{array}{lll} a_1 = \frac{2}{8} \cdot 0.0 = 0.00 & b_1 = \frac{2}{8} \cdot 76.4 = 19.10 & c_1 = 19.10 \\ a_2 = \frac{2}{8} \cdot 33.1 = 8.27 & b_2 = \frac{2}{8} \cdot 0.0 = 0.00 & c_2 = 8.27 \\ a_3 = \frac{2}{8} \cdot 20.4 = 5.09 & b_3 = \frac{2}{8} \cdot 12.7 = 3.18 & c_3 = 6.00 \end{array}$$

Dieses Amplitudenspektrum entspricht erwartungsgemäß genau jenen Elementarwellen, aus denen das Bildsignal des Bildes 3.2-9 zusammengesetzt wurde.

Das Amplitudenspektrum  $c_k$  wurde bisher in Beziehung zu den Frequenzen  $f_k$  gesehen (siehe Bild 6.7-4). Außerdem können die Frequenzen  $f_k$  zum Abtastintervall  $\Delta X$  in Beziehung gesetzt werden, sodaß eine neue Variable

$$u_k = f_k \cdot \Delta X = \Delta X / l_k \quad u < 1/2 \quad (6.7-20)$$

die gewünschte Normierung bringt. Die normierten Frequenzen  $u_k$  müssen infolge des Abtasttheoremes (6.7-14) kleiner als 0.5 bleiben. Für das eingeführte Zahlenbeispiel ist im Bild 6.7-6 das Amplitudenspektrum über den normierten Frequenzen  $u_k$  dargestellt.

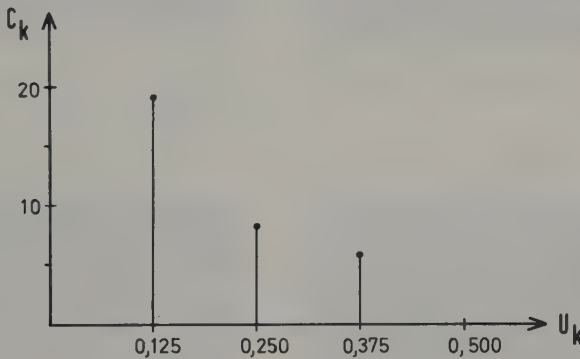


Bild 6.7-6: Amplitudenspektrum  $c_k$  abhängig von den normierten Frequenzen  $u_k$

Aufgabe 6.7-9: Das eingeführte Zahlenbeispiel ist für ein Digitalisierungsintervall  $\Delta X = 10$  zu wiederholen. Die 10 Grauwerte lauten: 15.23, 5.49, 13.72, 18.38, 3.18, -10.12, -18.87, -27.10, -13.27, 13.36. Das Amplitudenspektrum ist in Abhängigkeit von den normierten Frequenzen  $u_k$  darzustellen und in bezug zum früheren Ergebnis (Bild 6.7-6) kritisch zu würdigen.

Ein digitales Bild kann man in I Grauwertzeilen oder in J Grauwertspalten zerlegen (Bild 6.1-9) und für jede dieser Zeilen bzw. Spalten eine eindimensionale Fourieranalyse durchführen. Eleganter ist der Übergang von der eindimensionalen Grauwertverteilung  $g_i$  zur zweidimensionalen Grauwertverteilung  $g_{ij}$  und die Anwendung der zweidimensionalen Fouriertransformation, die z.B. für die Koeffizienten  $a_{kl}$  und  $b_{kl}$  in Anlehnung an Gleichung (6.7-16) lautet (Gleichung (6.7-1-4) im Anhang 6.7-1 ist eine Darstellung in der komplexen Zahlenebene):

$$a_{kl} = \frac{2}{I \cdot J} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J g_{ij} \cdot \cos(2\pi(f_k \cdot i \cdot \Delta X + f_l \cdot j \cdot \Delta Y))$$

$$b_{kl} = \frac{2}{I \cdot J} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J g_{ij} \cdot \sin(2\pi(f_k \cdot i \cdot \Delta X + f_l \cdot j \cdot \Delta Y))$$
(6.7-21)

Damit sind also auch die Koeffizienten  $a_{kl}, b_{kl}$  sowie das Amplitudenspektrum  $c_{kl}$  zweidimensionale Funktionen. Man kann das Amplitudenspektrum in einem dreidimensionalen Koordinatensystem (Bild 6.7-7 links) oder als digitales Bild mit Grauwerten, die die Amplituden repräsentieren (Bild 6.6-7 rechts), darstellen. Dabei ist es üblich, auch negative normierte Frequenzen  $u_k$  und  $u_l$  einzuführen. Sie rühren von der Formulierung der Fouriertransformation in der komplexen Zahlenebene her (siehe Gleichung (6.7-1-3) im Anhang 6.7-1).

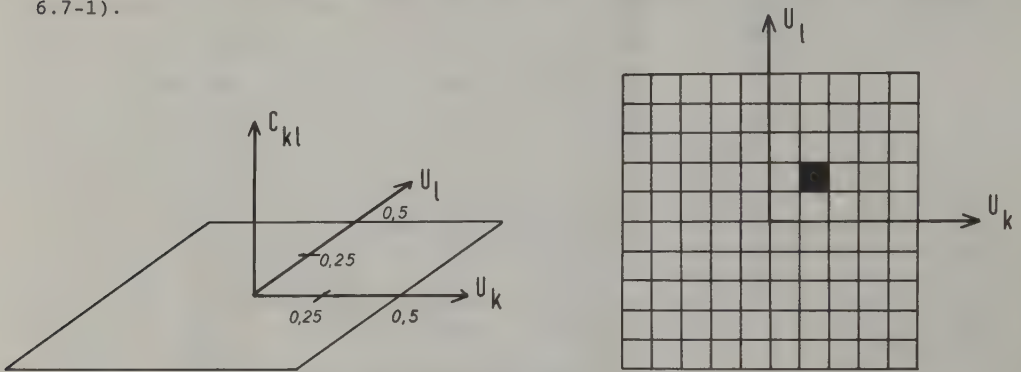
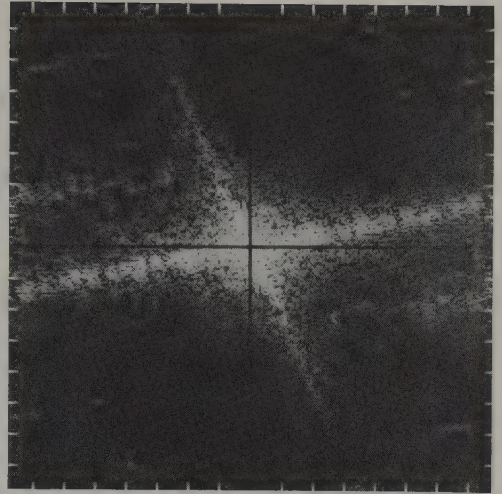
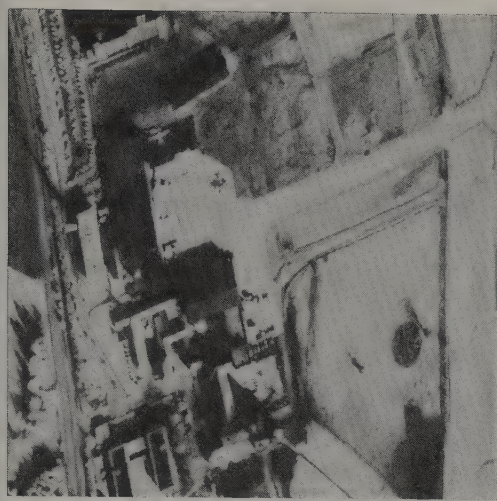


Bild 6.7-7: Zweidimensionales Spektrum in einem dreiachsigen Koordinatensystem (links) bzw. als digitales Bild (rechts)

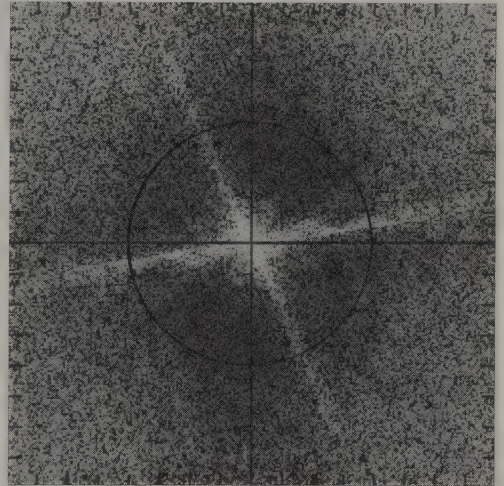
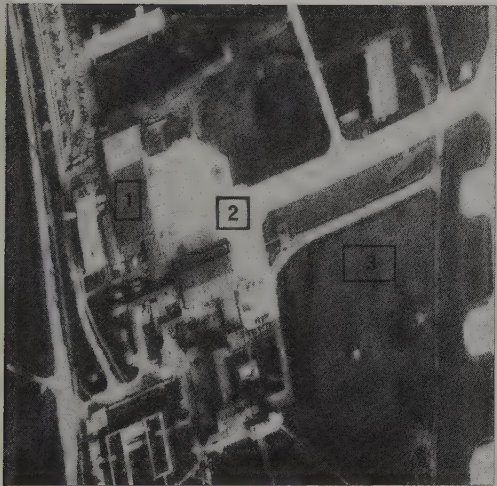
Die Aussagekraft der Spektren digitaler Bilder soll an zwei Beispielen gezeigt werden. Im Bild 6.7-8 sind digitales Bild und Spektrum nebeneinander angeordnet, wobei im Spektrum große Amplituden hell wiedergegeben sind. Die niedrigen Frequenzen, also die großen Wellenlängen, überwiegen, was bei einem großmaßstäbigen Bild die Regel ist. Lediglich entlang von zwei Diagonalen gibt es auch hohe Frequenzen. Eine helle Diagonale im Spektrum steht orthogonal auf den Kanten im Bild, die die hohen Frequenzen verursachen.

Zum Vergleich wird noch ein stark verrauschtes Bild mit seinem Spektrum betrachtet (Bild 6.7-9). Da das Rauschen im kurzwelligen Bereich dominiert, treten beim entsprechenden Spektrum am Rand, also im hochfrequenten Bereich, große Amplituden auf.





*Bild 6.7-8: Unverraushtes Bild mit Spektrum  
(Nowak, 1978)*



*Bild 6.7-9: Verrauschtes Bild mit Spektrum  
(Nowak, 1978)*

Dieser Abschnitt soll abgeschlossen werden mit dem Hinweis, daß Fouriertransformation und Fourieranalyse in der digitalen Bildverarbeitung und Nachrichtentechnik eine große Rolle spielen und viel Literatur zu finden ist. Beispielsweise sollen nur die Veröffentlichungen Azizi (1983), Brigham (1985), He (1989), Nowak (1978) und Pratt (1978) genannt werden. Das Buch von Brigham ist der Schnellen Fouriertransformation (fast fourier transform) gewidmet, einem Algorithmus, mit dem die Fouriertransformation besonders schnell durchgeführt werden kann.

### 6.7.3 Filterung im Frequenzbereich

Da mit der Fouriertransformation die Bildsignale in den Frequenzbereich überführt und mit der inversen Fouriertransformation aus dem Spektrum wieder die ursprünglichen Bildsignale hergestellt werden können, kann man vor der Rücktransformation im Spektrum gezielt solche Veränderungen anbringen, die die Qualität des rücktransformierten Bildes verbessern. Im Bild 6.7-10 ist dieser Zusammenhang skizziert.

Links oben ist als Eingabebild das Summensignal  $g(X)$  des Bildes 6.7-4 gezeichnet. Die Fouriertransformation liefert das Amplitudenspektrum  $c(f)$ . Das Amplitudenspektrum  $\bar{c}(f)$  des gefilterten Bildes  $\bar{g}(X)$  ergibt sich durch Multiplikation mit der im Frequenzbereich definierten Übertragungsfunktion  $H(f)$ :

$$\bar{c}(f) = H(f) \cdot c(f)$$

(6.7-22)

Aus dem Verlauf der Übertragungsfunktion  $H(f)$  kann man die Wirkungsweise der Filterung ablesen. Im Fall des Bildes 6.7-10 werden hohe Frequenzen gedämpft, z.B. das Rauschen eliminiert. Nach der inversen Fouriertransformation sieht man, daß der kurzwellige Anteil ganz verschwunden ist, der mittelwellige Anteil stark gedämpft und der langwellige Anteil nur etwas gedämpft wurde. Die im Frequenzbereich definierte Übertragungsfunktion  $H(f)$  beeinflusst unmittelbar den Kontrast des gefilterten Bildes in Abhängigkeit von der Ortsfrequenz. Man bezeichnet sie deshalb auch als Kontrastübertragungsfunktion im Frequenzbereich.



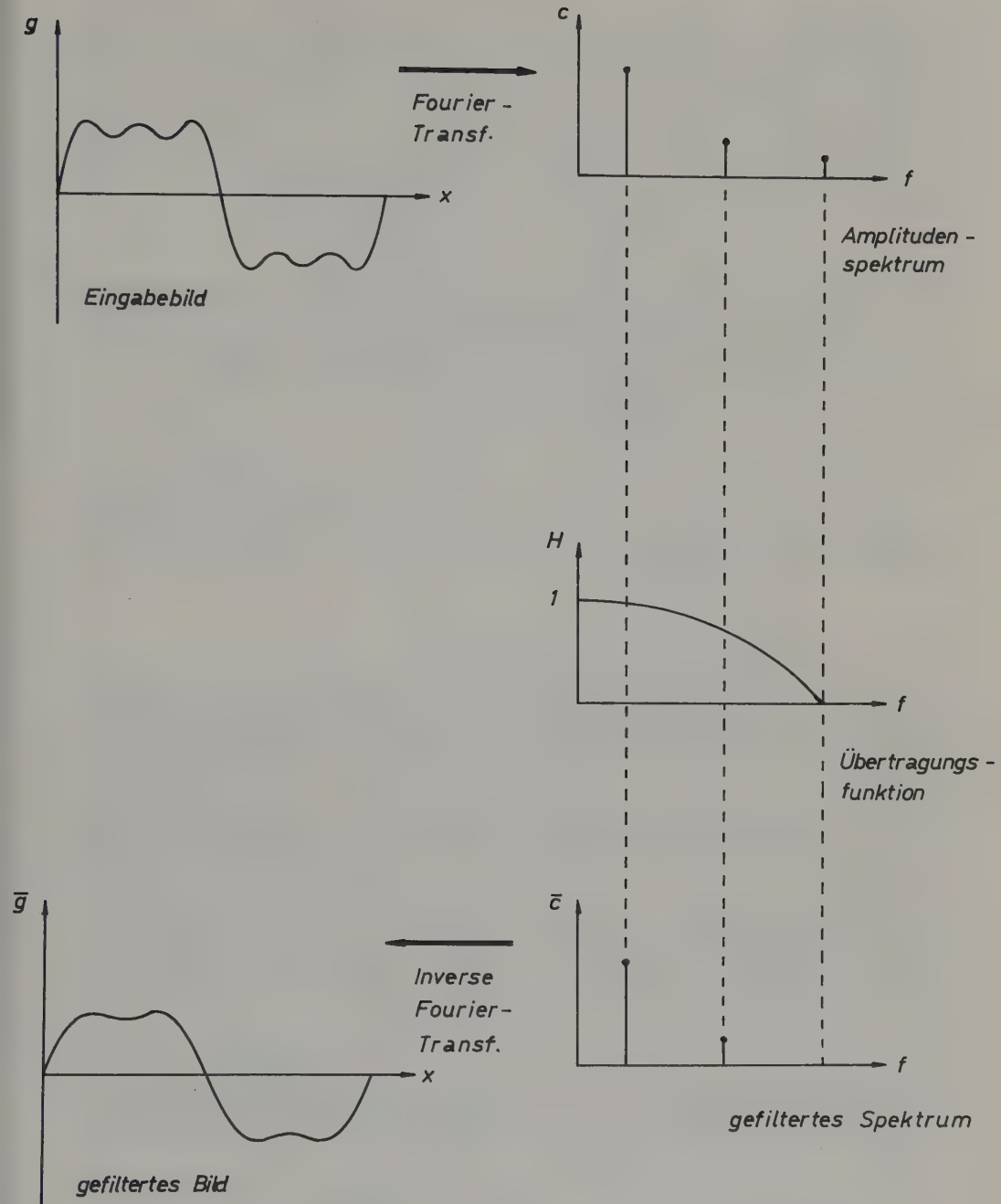


Bild 6.7-10: Filterung im Frequenzbereich

Zahlenbeispiel: Im Abschnitt 3.2.1.2 haben wir kennengelernt, daß durch die Abtastung die Kontraste der kurzwelligen Anteile der von der Erdoberfläche kommenden Signale gedämpft werden, und zwar umso mehr, je größer das Bildelement  $\Delta Y$  des Abtasters ist. Wir wollen nun die Aufgabe lösen, diese Kontrastminderung durch Filterung im Frequenzbereich zu korrigieren. Wir nehmen das durch  $\Delta Y = 16.6$  gedämpfte Bildsignal (Bild 3.2-9). Das dazugehörige Amplitudenspektrum wurde im Zahlenbeispiel des Abschnittes 6.7.2 mit der Fouriertransformation bereits berechnet. Die Koeffizienten  $a_k, b_k$  des Spektrums lauteten für die Wellenlängen  $l_k$  bzw. Frequenzen  $f_k$ :

$$\begin{array}{llll} l_1 = 100 & f_1 = 0.01 & a_1 = 0.00 & b_1 = 19.10 \\ l_1^1 = 50 & f_1^1 = 0.02 & a_1^1 = 8.27 & b_1^1 = 0.00 \\ l_3^2 = 33.3 & f_3^2 = 0.03 & a_3^2 = 5.09 & b_3^2 = 3.18 \end{array}$$

Da die Bildelementgröße  $\Delta Y$  aus der Abtastgeometrie und der Flughöhe bekannt ist, kennt man auch die Kontrastübertragungsfunktion  $H(f_k, \Delta Y)$  für die bei der Abtastung wirksamen Dämpfung (Gleichung (3.2-13) bzw. Bild 3.2-13). Daraus können wir die Dämpfung für die drei Wellenlängen berechnen:

$$\begin{array}{ll} f_1 = 0.01 & H(f_1, 16.6) = 0.955 \\ f_1^1 = 0.02 & H(f_1^1, 16.6) = 0.827 \\ f_3^2 = 0.03 & H(f_3^2, 16.6) = 0.637 \end{array}$$

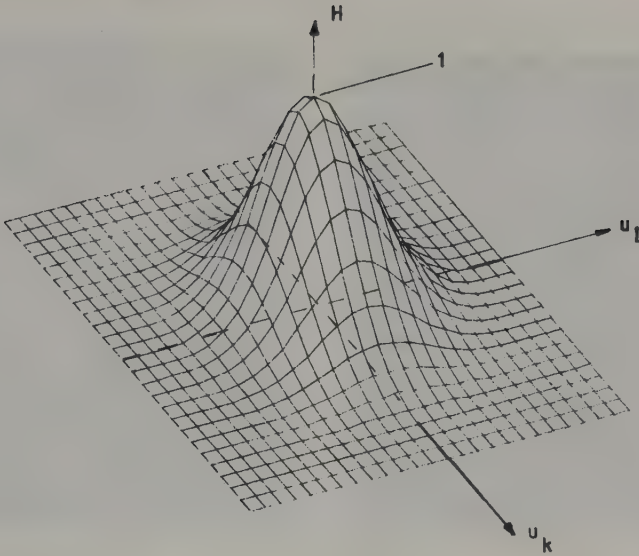
Mit einer Filterung im Frequenzbereich soll nun die Dämpfung korrigiert werden, d.h. wir müssen für diese Filterung die reziproke Übertragungsfunktion der Abtastung verwenden. Aus dem Amplitudenspektrum des gedämpften Signales folgt daher durch Division mit  $H(f_k, 16.6)$  das Amplitudenspektrum des korrigierten Signales:

$$\begin{array}{lll} f_1 = 0.01 & \bar{a}_1 = 0.00 & \bar{b}_1 = 20.00 \\ f_1^1 = 0.02 & \bar{a}_1^1 = 10.00 & \bar{b}_1^1 = 0.00 \\ f_3^2 = 0.03 & \bar{a}_3^2 = 8.00 & \bar{b}_3^2 = 5.00 \end{array}$$

Ein Vergleich mit den Sollwerten (siehe Zahlenbeispiel im Abschnitt 3.2.1.2) bestätigt, daß mit dieser Filterung im Frequenzbereich das von der Erdoberfläche ausgehende Signal fehlerfrei rekonstruiert werden konnte.

Um ein zweidimensionales Bild im Frequenzbereich filtern zu können, ist vorher eine zweidimensionale Fouriertransformation durchzuführen. Die Übertragungsfunktion für die Filterung ist eine zweidimensionale Variable. Am zweckmäßigsten stellt man sie - in Anlehnung an Bild 6.7-7 - in Abhängigkeit der (positiven und negativen) normierten Frequenzen  $u_k$  und  $u_l$  dar, d.h.  $H(u_k, u_l)$ . Das Bild 6.7-11 zeigt eine zweidimensionale Übertragungsfunktion zur Dämpfung des hochfrequenten Rauschens.

Diese Übertragungsfunktion unterdrückt die hohen Frequenzen und läßt die tiefen Frequenzen passieren. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von Tiefpaßfilterung. Die verschiedenen Filtertypen sind im Bild 6.7-12 skizziert.



*Bild 6.7-11: Zweidimensionale Übertragungsfunktion zur Dämpfung hochfrequenter Anteile*

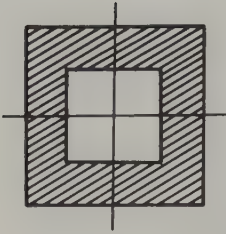
Als praktisches Beispiel benutzen wir das Bild 6.7-9. Es ist - wie das Spektrum zeigt - ein stark verrauschtes Bild, das mit einem Tiefpaßfilter verbessert werden kann. Dazu wurde die Übertragungsfunktion des Bildes 6.7-11 herangezogen. Das Ergebnis ist das Bild 6.7-13 (links).

Insbesondere an den Differenzen zum Originalbild (Bild 6.7-13 rechts) sieht man, daß eine Tiefpaßfilterung auch relevante Kanteninformation eliminiert, d.h. das Bild wird unschärfer.

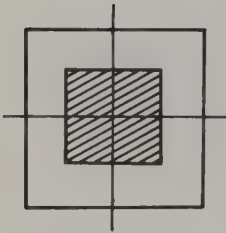
Große Bedeutung hat die Hochpaßfilterung. Mit ihr kann man die Bilder bisweilen so verbessern, daß man vorher nicht sichtbare Details gut erkennt. Als Beispiel diene das Satellitenbild 6.7-14 (links), das mit der Übertragungsfunktion 6.7-15 mit starker Anhebung hoher Frequenzen gefiltert wurde (Bild 6.7-14 rechts).

Aufgabe 6.7-10: Man überlege sich die Übertragungsfunktion für eine Filterung im Frequenzbereich, die die niedrigen Frequenzen unverändert, die mittleren Frequenzen verstärkt und die hohen Frequenzen dämpft.

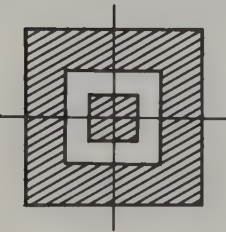
Aufgabe 6.7-11: Man wiederhole das Zahlenbeispiel mit einer Bildelementgröße  $\Delta Y = 33.3$  m. (Vorsicht: Die Elementarwelle mit  $f_3 = 0.03$  kann nicht mehr rekonstruiert werden.)

**TIEFPASS - Filterung**

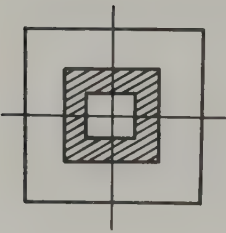
- Unterdrückung hoher Frequenzen
- Passieren niedriger Frequenzen

**HOCHPASS - Filterung**

- Unterdrückung niedriger Frequenzen
- Passieren hoher Frequenzen

**BANDPASS - Filterung**

- Passieren eines bestimmten Frequenzbereiches

**BANDSPERRE**

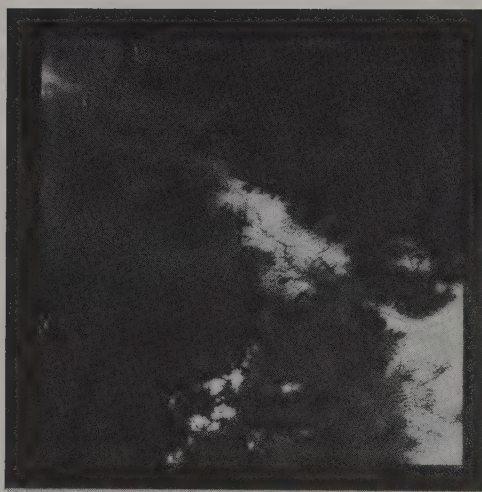
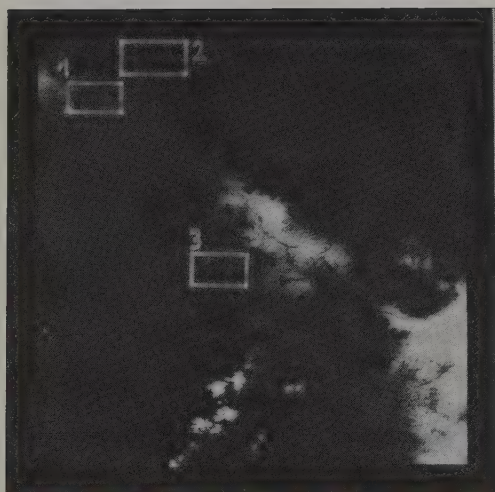
- Unterdrückung eines bestimmten Frequenzbereiches

*Bild 6.7-12: Verschiedene Filtertypen*





*Bild 6.7-13: Vom Bild 6.7-9 durch Tiefpaßfilterung abgeleitetes Bild (links) und Differenzenbild (5-fach verstärkt) (Nowak, 1978)*



*Bild 6.7-14: Eingabebild und Bild nach einer Hochpaßfilterung mit der Übertragungsfunktion des Bildes 4.4-15 (Nowak, 1978)*



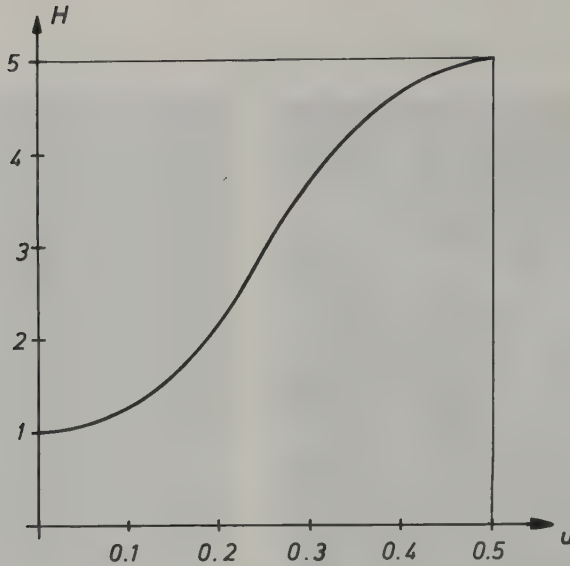
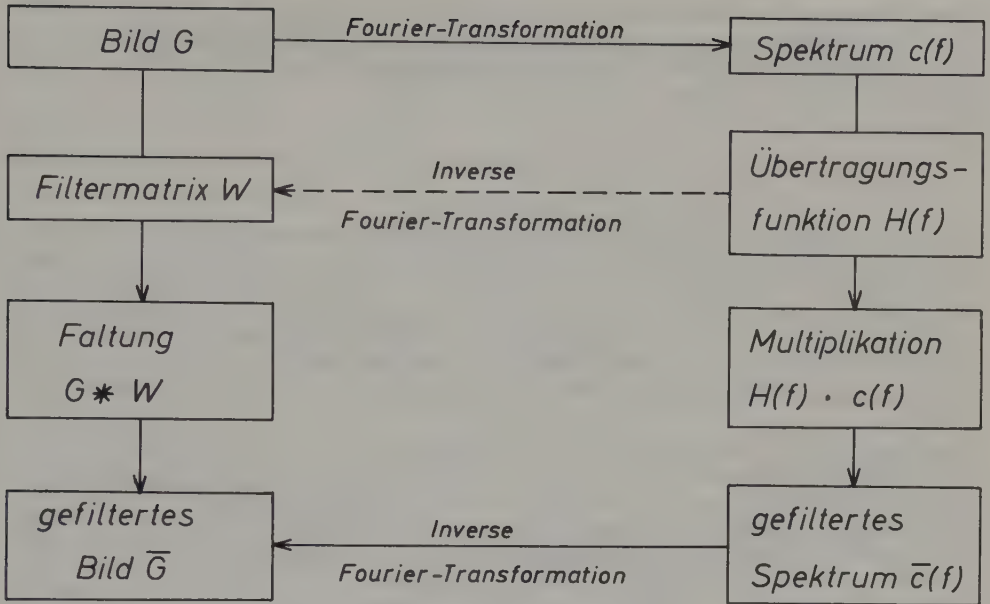


Bild 6.7-15: Übertragungsfunktion zur Anhebung hoher Frequenzen (die zweidimensionale Übertragungsfunktion entsteht durch Rotation um die H-Achse)

#### 6.7.4 Zusammenhang zwischen der Filterung im Orts- und der im Frequenzbereich

Im Ortsbereich wird die Filterung durch eine Faltung des Bildes  $\underline{G}$  mit der Filtermatrix  $\underline{W}$  durchgeführt. Das Ergebnis ist das gefilterte Bild  $\underline{\bar{G}}$  (Gleichung (6.7-3)). Eine Filterung im Frequenzbereich beginnt dagegen mit der Fouriertransformation des Bildes  $\underline{G}$  in den Frequenzbereich. Das so erhaltene Spektrum  $c(f)$  wird dann mit der Übertragungsfunktion  $H(f)$  multipliziert (Gleichung (6.7-22)). Das Ergebnis ist das Spektrum  $\bar{c}(f)$  des gefilterten Bildes  $\underline{\bar{G}}$ , das durch inverse Fouriertransformation aus dem Spektrum  $\bar{c}(f)$  gewonnen wird. Dieser Zusammenhang ist im Bild 6.7-16 dargestellt.

Das Ergebnis ist auf beiden Wegen gleich (siehe z.B. Haberäcker, 1985, He, 1989). Die Entscheidung über die jeweilige Variante hängt vom Aufwand und von der Strategie des Filterentwurfes ab. Bei kleiner Filtermatrix  $\underline{W}$  ist der Aufwand über die Faltung geringer, weil die Fouriertransformationen entfallen. Der Umweg über das Spektrum ist aber häufig notwendig, da gewisse Filtertypen nur im Frequenzbereich in Form der Übertragungsfunktion  $H(f)$  entworfen werden können.



Ortsbereich

Frequenzbereich

Bild 6.7-16: Zusammenhang zwischen Filterung im Orts- und Frequenzbereich

Nach Festlegung der Übertragungsfunktion  $H(f)$  kann man daraus auch die Filtermatrix  $\underline{W}$  ableiten und die eigentliche Filterung durch Faltung im Ortsbereich durchführen (gestrichelte Variante im Bild 6.7-16). Die Elemente  $w_k$  der Filtermatrix  $\underline{W}$  bekommt man für den eindimensionalen Fall mit den normierten Frequenzen  $u$  aus der Formel (siehe Gleichung (6.7-1-9) des Anhanges 6.7-1):

$$w_k = \int_{u=-0.5}^{u=0.5} H(u) (\cos(2\pi \cdot k \cdot u)) du \quad (6.7-23)$$

Anmerkung: Diese inverse Fouriertransformation ist etwas anders aufgebaut als die inverse Fouriertransformation (6.7-15). Die Ursache liegt darin, daß hier im Frequenzbereich eine kontinuierliche Funktion  $H(u)$  gegeben ist und nicht - wie bei der Gleichung (6.7-15) - diskrete Koeffizienten  $a_k, b_k$ .

Die Umkehrung der Formel (6.7-23), also die Fouriertransformation, erlaubt aus den Elementen  $w_k$  der Filtermatrix  $\underline{W}$  auch die Übertragungsfunktion  $H(u)$  zu berechnen. Die Formel - wiederum für den eindimensionalen Fall - lautet (siehe Gleichung (6.6-1-10) des Anhanges 6.7-1):

$$H(u) = \sum_{k=-n}^n w_k \cdot \cos(2\pi \cdot k \cdot u) \quad (6.7-24)$$

Dabei ist  $2n+1$  die Größe der Filtermatrix. Mit der Formel (6.7-24) kann man wichtige Fragen im Zusammenhang mit der linearen bzw. bilinearen Interpolation (6.4.1b) beantworten. Die lineare bzw. bilineare Interpolation kann nämlich als Filterung interpretiert werden; damit ist die Filtermatrix  $\underline{W}$  bekannt. Mittels (6.7-24) kann daraus die Übertragungsfunktion  $H$  berechnet werden. Sie gibt uns Auskunft über das Maß der Dämpfung hoher Frequenzen bei der linearen und bilinearen Interpolation (weitere Details siehe He, 1989).

Zahlenbeispiel: Im Abschnitt 6.7.1, Gleichung (6.7-11), haben wir den Laplace-Operator kennengelernt. Die Subtraktion des Bildes, das der Laplace-Operator liefert, vom Originalbild, kann unmittelbar durch eine Faltung des Originalbildes mit der Filtermatrix (6.7-12) berechnet werden. Wir wissen zwar bereits, daß diese Operation die hohen Frequenzen in den Bildern anhebt, d.h. die Kanten verstärkt (vergleiche die Bilder 6.6-13 und 6.6-16), doch fehlt uns noch die Quantifizierung dieser Maßnahme. Mit Hilfe der Formel (6.7-24) können wir nun die zu einer Filtermatrix  $\underline{W}$  gehörende Übertragungsfunktion  $H(u)$  berechnen, die uns genau angibt, wie die Amplituden der einzelnen Frequenzen verändert werden.

Die Filtermatrix  $\underline{W}$  für den eindimensionalen Fall lautet (Ergebnis der Aufgabe 6.7-6) für symmetrische Indizes mit dem Element  $w_0$  als Zentrum:

$$w_{-1} = -1, \quad w_0 = 3, \quad w_1 = -1 \quad (6.7-25)$$

(6.7-24):

$$H(u) = \sum_{k=-1}^1 w_k \cdot \cos(2\pi \cdot k \cdot u) = -1 \cos(2\pi \cdot u) + 3(1) - 1 \cos(2\pi \cdot u) = 3 - 2 \cos(2\pi \cdot u) \quad (6.7-26)$$

Im Bild 6.7-15 ist die Übertragungsfunktion in Abhängigkeit der normierten Frequenz  $u$  dargestellt. Wir sehen z.B., daß die normierte Frequenz  $u = 0.125$  um den Faktor 1.5, die Frequenz  $u = 0.25$  um den Faktor 3, die Frequenz  $u = 0.375$  um den Faktor 4.5 und die Frequenz  $u = 0.5$  um den Faktor 5 bei einer Faltung mit der Filtermatrix (6.7-25) überhöht wird. (Im Bild 6.6-16 ist ebenfalls die Wirkung der Kantenverstärkung durch die 2. Ableitung, die dem Laplace-Operator entspricht, dargestellt: Die Kanten werden umso mehr verstärkt, je "schärfer" sie im Original sind.)

Umgekehrt kann aus der Übertragungsfunktion  $H(u)$  die für die Faltung erforderliche Filtermatrix mit der Gleichung (6.7-23) abgeleitet werden. Auf unser Zahlenbeispiel übertragen, ist aus der Übertragungsfunktion (6.7-26) die Filtermatrix zu berechnen:

(6.7-23):

$$w_k = \int_{u=-0.5}^{0.5} (3-2\cos(2\pi \cdot u))(\cos(2\pi \cdot k \cdot u)) du \quad (6.7-27)$$

Für das Element  $w_0$  der Filtermatrix lautet (6.7-27):

$$w_0 = \int_{u=-0.5}^{0.5} (3-2\cos(2\pi \cdot u)) du = \left| 3u - \frac{2}{2\pi} \sin(2\pi \cdot u) \right|_{u=-0.5}^{u=0.5} = 3$$

Für das Element  $w_1$  der Filtermatrix lautet (6.7-27):

$$w_1 = \int_{u=-0.5}^{0.5} (3-2\cos(2\pi \cdot u))(\cos(2\pi \cdot u)) du = \int_{u=-0.5}^{0.5} (3\cos(2\pi \cdot u) - 2\cos^2(2\pi \cdot u)) du$$

Nach der Integration:

$$w_1 = \left| \frac{3}{2\pi} \sin(2\pi \cdot u) - \frac{1}{2\pi} (\sin(2\pi \cdot u)\cos(2\pi \cdot u) + 2\pi \cdot u) \right|_{u=-0.5}^{u=0.5} = -1$$

Für das Element  $w_{-1}$  der Filtermatrix erhält man ebenfalls -1, sodaß die Identität mit der Filtermatrix (6.7-25) hergestellt ist.

Der zahlenmäßige Nachweis, daß die Faltung mit der Filtermatrix (6.7-25) und die Multiplikation des Spektrums mit der Übertragungsfunktion (6.7-26) die gleiche Filterung bewirkt, ist noch von Interesse. Als Bildsignal wählen wir das Zahlenbeispiel des Abschnittes 6.7.2. In der folgenden Tabelle ist die Faltung mit der Filtermatrix (6.7-25) zusammengestellt.

$i \cdot \Delta X$	$g_i$	$\bar{g}$ mit Faltung
12.5	12.16	
25.0	7.65	-8.56
37.5	19.35	47.22
50.0	3.18	2.35
62.5	-12.16	-15.46
75.0	-24.19	-41.06
87.5	-19.35	-47.22
100.0	13.36	

Das gleiche Ergebnis müssen wir auch mit der Übertragungsfunktion (6.7-26) erhalten. Das Spektrum des ursprünglichen Signales ist uns bereits bekannt (siehe Abschnitt 6.7.2). Die Elementarwellen haben die Frequenzen  $f_k = 0.01, 0.02, 0.03$ . Mit dem Digitalisierungsintervall  $\Delta X = 12.5$  lauten deshalb die normierten Frequenzen  $u_k = 0.125, 0.25, 0.375$ . Die Faltung im Frequenzbereich geschieht nun durch Multiplikation der Koeffizienten  $a_k, b_k$  des Spektrums (siehe Abschnitt 6.7.2) mit den Werten der Übertragungsfunktion (6.7-26) für die drei normierten Frequenzen  $u_k$ . Die gesamte Berechnung ist in der folgenden Tabelle zusammengefaßt:

Fre- quenzen $f_k$	normierte Frequenzen $u_k$	Werte der Über- tragungsfunktion $H(u_k)$ (6.7-26)	urspr. Spektrum $a_k, b_k$ (Abschn. 6.7.2)	gef. Spektrum $\bar{a}_k, \bar{b}_k$ $= (a_k, b_k) \cdot H(u_k)$
0.01	0.125	1.586	0.00 19.10	0.00 30.29
0.02	0.250	3.000	8.27 0.00	24.81 0.00
0.03	0.375	4.414	5.09 3.18	22.46 14.04

Aus dem Spektrum  $\bar{a}_k, \bar{b}_k$  muß sich das aus der Faltung ermittelte Bildsignal  $\bar{g}$  ergeben. Wir machen eine Stichprobe bei  $3 \cdot \Delta X = 37.5$  (Gleichung 6.7-15):

$$\bar{g}_3 = 30.29 \sin(2\pi \cdot 0.01 \cdot 37.5) + 24.81 \cos(2\pi \cdot 0.02 \cdot 37.5) + 22.46 \cos(2\pi \cdot 0.03 \cdot 37.5) + 14.04 \sin(2\pi \cdot 0.03 \cdot 37.5) = 47.22$$

Der Vergleich mit der vorletzten Tabelle zeigt die Identität der Filterung durch Faltung im Ortsbereich und der Filterung durch Multiplikation im Frequenzbereich.

Aufgabe 6.7-12: Man berechne in dem eingeführten Zahlenbeispiel auch die Elemente  $w_1$  und  $w_2$  der Filtermatrix aus der Übertragungsfunktion (6.7-26).

Aufgabe 6.7-13: Aus dem mit Faltung gewonnenen Bildsignal  $\bar{g}$  (siehe vorletzte Tabelle) ist durch Fouriertransformation das Spektrum in Form der Koeffizienten  $\bar{a}_k, \bar{b}_k$  zu ermitteln. Vorher ist allerdings durch periodische Fortsetzung des Bildsignales noch  $\bar{g}_1$  und  $\bar{g}_8$  zu berechnen. (Hinweis: Es muß sich das in der letzten Spalte der letzten Tabelle wiedergegebene Spektrum ergeben.)

Aufgabe 6.7-14: Das gegebene Bildsignal soll nicht mit einem Intervall von  $\Delta X = 12.5$  sondern mit einem Intervall von  $\Delta X = 10$  digitalisiert sein. (Siehe Aufgabe 6.7-9). Mit den neuen Grauwerten ist ebenfalls eine Faltung mit der Filtermatrix (6.7-25) und eine Filterung im Frequenzbereich mit der Übertragungsfunktion (6.7-26) durchzuführen. Wird dieses Ergebnis vom Ergebnis abweichen, das mit dem Digitalisierungsintervall  $\Delta X = 12.5$  erhalten wurde und in den letzten beiden Tabellen zusammengefaßt ist ?

#### 6.7.5 Entwurf eines Filters

Wir haben bereits einige Entwurfsmethoden für Filter kennengelernt. Im Abschnitt 6.7.1 haben wir Filter im Ortsbereich entworfen. Dabei sind der Phantasie nahezu keine Grenzen gesetzt. Man probiert gezielt bis sich die gewünschten Effekte im gefilterten Bild zeigen. Für die Beurteilung ist es



oft hilfreich, die entworfene Filtermatrix  $\underline{W}$  mit der Gleichung (6.7-24) bzw. ihrem zweidimensionalen Pendant in den Frequenzbereich zu transformieren. Das Ergebnis ist die Übertragungsfunktion  $H$ , die über die Veränderung der Amplituden abhängig von der Frequenz Auskunft gibt. Die Filtermatrizen im Ortsbereich werden in vielen Fällen auch mit gleitenden Polynomflächen (C 3.3.1) vorgegeben, deren Koeffizienten man aus bekannten Stützstellen in der Filtermatrix berechnet (He, 1989).

So wie man im Ortsbereich beliebige Filtermatrizen  $\underline{W}$  vorgeben kann, kann man im Frequenzbereich beliebige Übertragungsfunktionen  $H$  wählen. Dadurch manipuliert man - wie im Abschnitt 6.7.3 gezeigt - direkt die Amplituden der einzelnen Frequenzen. Zur Beurteilung eines solchen Filters bzw. zur Durchführung der Filterung als Faltung ist manchmal eine Transformation (6.7-23) der Übertragungsfunktion  $H$  in den Ortsbereich erforderlich. Dadurch können sich allerdings sehr große Filtermatrizen  $\underline{W}$  ergeben, die einen sehr großen Aufwand bei der Faltung nach sich ziehen würden. Aus diesem Grund sind in der Praxis in manchen Fällen kleinere Filtermatrizen zu erzwingen. Das wird durch eine Approximation nach der Methode der kleinsten Quadrate etwa in der Form  $\Sigma (H_{\text{Soll}} - H_{\text{Ist}})^2 = \min$  erreicht, wobei  $H_{\text{Soll}}$  die vorgegebene Übertragungsfunktion zu einer großen Filtermatrix und  $H_{\text{Ist}}$  die Übertragungsfunktion zu der erzwungenen kleinen Filtermatrix darstellt (siehe Fritsch, 1982, He, 1989).

Die beiden bisher genannten Entwurfsmethoden dienen im weitesten Sinne zur sogenannten Bildverbesserung. Nun besprechen wir die Entwurfsmethode zur Bildrestaurierung. In diesem Fall haben wir die Information über den Abbildungsprozeß vom ursprünglichen Bild zum gegebenen Bild. Das gegebene Bild ist nun so zu verändern, daß wieder das ursprüngliche Bild entsteht.

Die Bildrestaurierung wird häufig mit Hilfe der sogenannten inversen Filterung gelöst. Wir haben sie im Abschnitt 6.7.3 bereits benutzt. Das "ursprüngliche" Bild war dort das von der Erdoberfläche kommende Signal; das gegebene Bild war das abgetastete Signal. Dieser Abbildungsprozeß ist durch die Kontrastübertragungsfunktion  $H(f)$  der gleitenden Mittelwertbildung charakterisiert. Das Amplitudenspektrum des ursprünglichen Bildes,  $c(f)$ , und das des gegebenen Bildes,  $\bar{c}(f)$ , hängen mit der Übertragungsfunktion  $H(f)$  entsprechend der Gleichung (6.7-22) zusammen. Daraus ergibt sich das Amplitudenspektrum des gesuchten ursprünglichen Bildes:

$$c(f) = \overline{c}(f)/H(f) = \overline{c}(f) \cdot \overline{H}(f) \quad (6.7-28)$$

Die Gleichung (6.7-28) ist die Grundgleichung der inversen Filterung für den eindimensionalen Fall. Für den zweidimensionalen Fall ist diese Gleichung entsprechend zu erweitern.

Die Übertragungsfunktion  $H(f)$  der Bildentstehung und die Übertragungsfunktion  $\overline{H}(f)$  der Bildrestaurierung ergänzen sich auf 1:

$$H(f) \cdot \overline{H}(f) = 1 \quad (6.7-29)$$

Die inverse Filterung kann man auch mit der Gleichung (6.7-3) im Ortsbereich formulieren: Dabei gehen wir vom folgenden Bildentstehungsprozeß aus:

$$\overline{G} = G * W \quad (6.7-30)$$

Dabei ist  $G$  die ursprüngliche Bildmatrix,  $\overline{G}$  die Matrix des gegebenen Bildes und  $W$  die Filtermatrix der Bildentstehung. Nun suchen wir eine neue Filtermatrix  $\overline{W}$ , die bei einer Filterung des gegebenen Bildes  $\overline{G}$  das ursprüngliche Bild  $G$  ergibt:

$$G = \overline{G} * \overline{W} \quad (6.7-31)$$

(6.7-30) in (6.7-31):

$$\overline{G} = G * W * \overline{W} \quad (6.7-32)$$

Die bekannte Filtermatrix  $W$  der Bildentstehung und die gesuchte Filtermatrix  $\overline{W}$  für die Bildrestaurierung müssen daher folgende Gleichung erfüllen:

$$W * \overline{W} = \delta \quad (6.7-33)$$

$\delta$  ist die sogenannte Dirac-Funktion, die im zentralen Bildelement den Wert 1 und bei den übrigen Bildelementen den Wert 0 annimmt. Die gesuchte Filtermatrix  $\overline{W}$  für die Restaurierung erhält man auf zwei verschiedenen Wegen:

- Ist die Übertragungsfunktion  $H(f)$  der Bildentstehung gegeben, ist die Übertragungsfunktion  $\overline{H}(f)$  der Bildrestaurierung aus der Gleichung (6.7-29) bestimmbar. Mittels Gleichung (6.7-23) bekommt man  $\overline{W}$ .
- Ist die Filtermatrix  $W$  der Bildentstehung gegeben, ergibt sich aus der Gleichung (6.7-33) die Filtermatrix  $\overline{W}$  der Restaurierung. Dabei kann  $\overline{W}$  sehr groß werden. Um eine kleinere Matrix zu erzwingen, benutzt man anstelle der Gleichung (6.7-33) die Approximationsgleichung  $\sum (W * \overline{W} - \delta)^2 = \min$ .

Falls die Bildrestaurierung auf der Grundlage der Gleichung (6.7-29) oder (6.7-33) - beide Gleichungen gehen übrigens durch Fouriertransformation ineinander über - durchgeführt wird, ergibt sich das ursprüngliche Bild ohne Fehler. Falls bei der Bildentstehung aber (zufälliges) Rauschen im Spiel ist - wie in der Praxis üblich -, dann gelingt die Bildrestaurierung nur näherungsweise.

Literatur: Fritsch (1982), Gonzales, Wintz (1987), Haberñcker (1985), He (1989), Nowak (1978), Pratt (1978).

## 6.8 Multispektrale Klassifizierung

Multispektrale Bilddaten - also in mehreren Kanälen vorhandene digitale Bilder - bieten gute Voraussetzungen zur automatischen Klassifizierung. Mittels EDV soll der Typ der abgebildeten Objektflächen erkannt und sollen die Flächen gleicher Objekttypen gegeneinander abgegrenzt werden. Im Bild 6.8-1 ist ein dreikanaliges Bild mit vier Objekttypen  $O^i$  ( $i=1(1)4$ ), die auch als Objektklassen bezeichnet werden, skizziert.

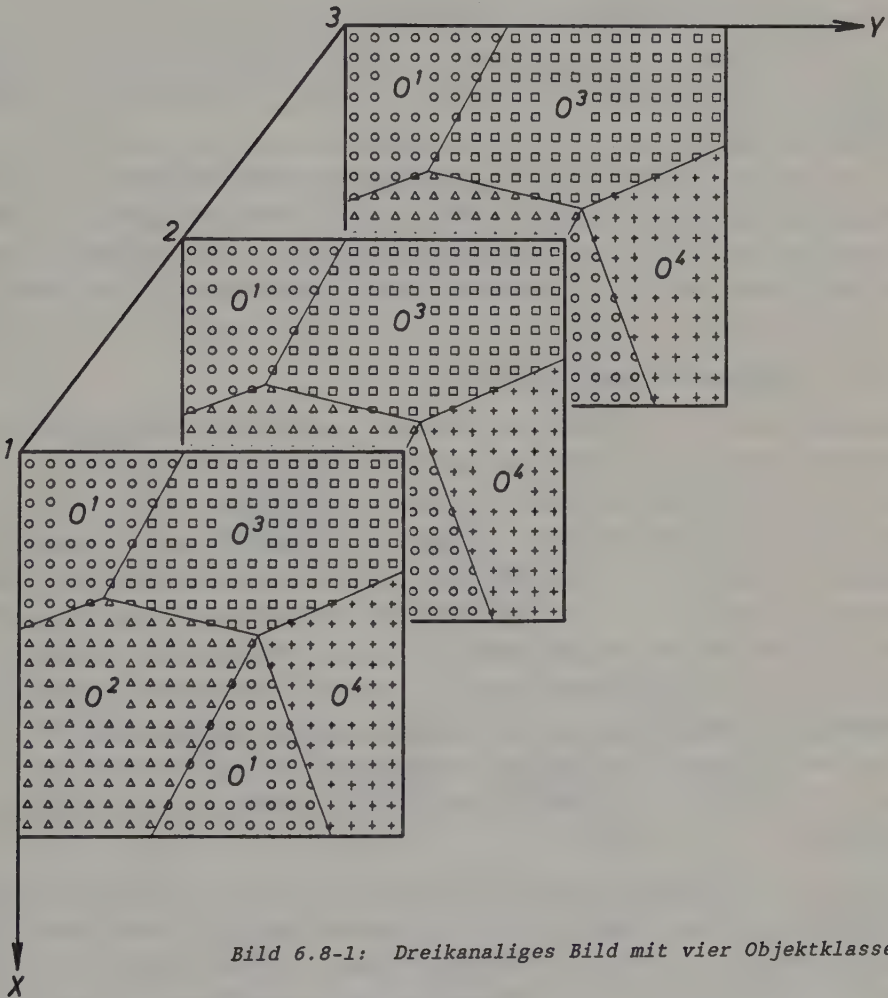


Bild 6.8-1: Dreikanaliges Bild mit vier Objektklassen

Einer multispektralen Klassifizierung geht in der Regel die geometrische Rektifizierung (6.4) voraus. Die Begrenzungslinien der Flächen gleicher Objekttypen sollen ja im Landeskoordinatensystem und nicht im verzerrten Koordinatensystem der ursprünglichen Aufnahmen anfallen. Man kann sich aber auch vorstellen, daß mit den nichtrektifizierten Bildern klassifiziert und erst das Klassifikationsergebnis ins Landeskoordinatensystem übergeführt wird. Soweit möglich, sollen auch radiometrische Korrekturen (6.5) vor einer Klassifizierung an den Grauwerten angebracht werden. Wir werden aber auch Verfahren kennenlernen, die im Rahmen der Klassifizierung atmosphärische und ähnliche Störeinflüsse berücksichtigen (6.8.6). Zur Elimination von Bildstörungen etc. wird vor einer Klassifizierung häufig auch eine Filterung (6.7) durchgeführt. Man spricht in diesem Zusammenhang von einer Vorverarbeitung.

Wir stellen uns im Kapitel 6.8.1 (mehrdimensionaler Merkmalsraum) zunächst die Frage, warum Multispektralbilder bessere Voraussetzungen für eine Klassifizierung bieten als einkanalige Bilder, also Schwarzweißbilder. Daran anschließend werden wir mehrere Klassifizierungsverfahren beschreiben.

#### 6.8.1 Mehrdimensionaler Merkmalsraum

Im Abschnitt 6.6.2 (Äquidensiten) haben wir bereits ein Klassifizierungsverfahren kennengelernt. Dort wurden - in einem einkanaligen Bild - die Grauwerte durch Schwellenwerte  $s_i$  voneinander getrennt (Bild 6.6-8). Im Bild 6.8-2 ist skizziert, daß - infolge der unregelmäßigen Streuung der Grauwerte innerhalb einer Objektklasse - eine Klassifizierung mit einem einkanaligen Bild, d.h. im eindimensionalen Merkmalsraum, sehr fehlerhaft sein kann. Entlang der Grauwertskala  $g_1$  lassen sich keine Schwellenwerte  $s_i$  finden, die die vier Objektklassen  $O^i$  ( $i=1(1)4$ ) voneinander trennen. Der Übergang vom eindimensionalen zum zweidimensionalen Merkmalsraum, d.h. zu einem zweikanaligen Bild mit den Grauwerten  $g_1$  und  $g_2$ , schafft - wie im Bild 6.8-3 skizziert - für die Klassifizierung wesentlich bessere Voraussetzungen.

Aber auch im zweidimensionalen Merkmalsraum können sich - falls die Grauwerte der einzelnen Klassen stark streuen und/oder die Schwerpunkte der einzelnen Klassen nicht weit auseinanderliegen - die Punktwolken (cluster) noch überlappen, wie z.B. die Punktwolken der Objektklassen  $O^1$  und  $O^2$  im Bild 6.8-3. Grauwerte  $g_3$  in einem dritten Kanal, der senkrecht zur

- Objektklasse 1 ( $O^1$ )
- △ Objektklasse 2 ( $O^2$ )
- Objektklasse 3 ( $O^3$ )
- + Objektklasse 4 ( $O^4$ )

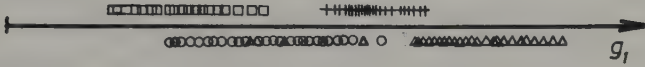


Bild 6.8-2: Grauwert-Verteilung der Bildelemente von vier Objektklassen in einem Kanal

$g_1 g_2$ -Ebene anzuordnen ist, entwirren die Bildelemente der verschiedenen Klassen eventuell vollkommen. Rein abstrakt kann man noch einen 4., 5. etc. Kanal für einen 4- bzw. 5-dimensionalen Merkmalsraum hinzufügen. Die Grauwerte  $g_k$  ( $k=1(1)K$ ) spannen also einen Merkmalsraum mit  $K$  Dimensionen auf.  $K$  ist die Anzahl der Kanäle bzw. Spektralbereiche des Multispektralbildes. Das Multispektralbild in Abhängigkeit der Ortskoordinaten  $X, Y$  ist dagegen immer "dreidimensional" (Bild 6.8-1), wobei die  $XY$ -Ebene der Bildebene entspricht und entlang der dritten Dimension die verschiedenen Kanäle angeordnet sind.

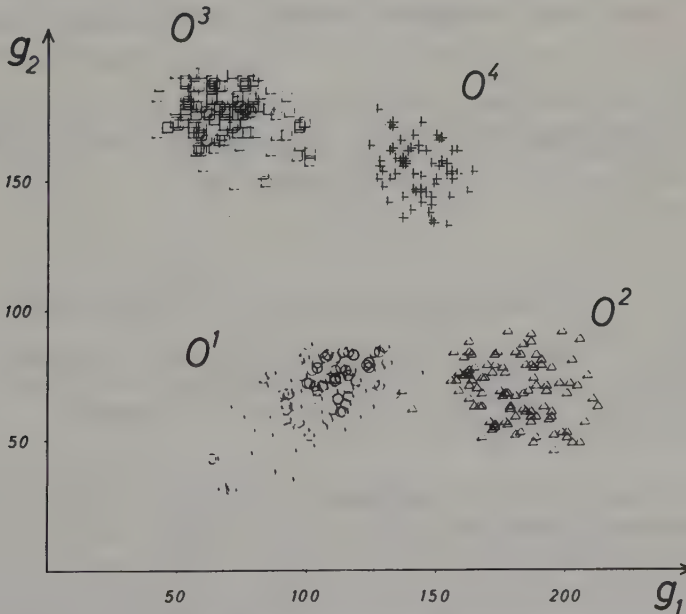


Bild 6.8-3: Grauwert-Verteilung der Bildelemente von vier Objektklassen in zwei Kanälen (scattergramm)



### 6.8.2 Klassifizierung mittels kürzester Entfernung (minimum distance)

Bevor das erste Klassifizierungsverfahren erläutert wird, sind noch die Begriffe "überwachte" und "unüberwachte" Klassifizierung zu klären. Bei der Überwachten Klassifizierung (supervised classification) kennt man innerhalb eines jeden Objekttyps ein kleines Testgebiet, das auch Trainingsgebiet genannt wird. Die überwachte Klassifizierung läuft also darauf hinaus, aufgrund der bekannten Objektklassen der Trainingsgebiete, also aufgrund von Stichproben, den übrigen Bildinhalt zu klassifizieren. Bei der unüberwachten Klassifizierung (unsupervised classification) hat man dagegen überhaupt keine Referenzdaten und klassifiziert den gesamten Bildinhalt ohne Bodenbeobachtungen. Für die Einteilung des Bildes in Klassen werden ausschließlich die Grau- bzw. Farbwerte des Bildes benutzt. Erst nach einer solchen unüberwachten Klassifizierung bemüht man sich - z.B. in einer Geländebegehung -, eine Zuordnung zu den tatsächlichen Objektklassen zu finden.

In der Fortsetzung befassen wir uns mit der Überwachten Klassifizierung. Wir nehmen an, von den vier Objektklassen des Bildes 6.8-1 jeweils ein (kleines) Trainingsgebiet zu kennen. Die Trainingsgebiete sind in den Bildmatrizen  $\underline{g}_1$  und  $\underline{g}_2$  gekennzeichnet (Bild 6.8-4a,b). Außerdem sind die Bildelemente der vier Trainingsgebiete in Abhängigkeit der Grauwerte  $g_1$  und  $g_2$  dargestellt (Bild 6.8-4c). (Wegen der besseren Anschaulichkeit beschränken wir uns zunächst auf zwei Kanäle).

Für ein Trainingsgebiet der jeweiligen Objektklasse  $O^i$  werden zunächst Schwerpunkte  $O_s^i$  gebildet (Bild 6.8-4c). Zu diesem Zweck werden die Grauwerte  $g_k^i$  des jeweiligen Trainingsgebietes gemittelt:

$$\bar{g}_k^i = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N g_{k,l}^i \quad k = 1(1)K \quad (6.8-1)$$

$k$   $\hat{=}$  Index für den jeweiligen Kanal, der von 1 in Stufen von 1 bis K läuft.

$N$   $\hat{=}$  Anzahl der Bildelemente im Trainingsgebiet der jeweiligen Objektklasse, wobei der Index l in Stufen von 1 bis N läuft.

$i$   $\hat{=}$  Index für die jeweilige Objektklasse, wobei insgesamt I Objektklassen angenommen werden.

Die Mittelwerte  $\bar{g}_k^i$  aller K Kanäle können für jede Objektklasse  $O^i$  zu einem Vektor  $\bar{\underline{g}}^i$  zusammengefaßt werden:

$$\bar{\underline{g}}^i = (\bar{g}_1^i \dots \bar{g}_K^i)^T \quad (6.8-2)$$

Ein zu klassifizierendes Bildelement  $U$  mit seinem Grauwertvektor  $\mathbf{g} = (g_1 \dots g_k \dots g_K)^T$  wird nun jener Objektklasse  $O^i$  zugeschrieben, zu deren Schwerpunkt  $O_s^i$  die kürzeste Entfernung  $\overline{UO_s^i}$  auftritt, was gleichbedeutend ist mit der minimalen euklidischen Norm der Vektoren  $\|\mathbf{g} - \bar{\mathbf{g}}^i\|_{\min}$ . In unserem Demonstrationsbeispiel wird das letzte zu klassifizierende Bildelement mit den Grauwerten ( $g_1 = 137$  und  $g_2 = 159$ ) der Objektklasse  $O^4$  zugeschrieben. Das Ergebnis der gesamten Klassifizierung ist eine Bildmatrix mit den eingetragenen Objektklassen  $O^1 \hat{=} 1$ ,  $O^2 \hat{=} 2$ ,  $O^3 \hat{=} 3$ ,  $O^4 \hat{=} 4$  (Bild 6.8-4d). Drei Bildelemente sind falsch klassifiziert. Aufgrund des Bildes 6.8-3 treten erwartungsgemäß Schwierigkeiten bei der Trennung der Objektklassen  $O^1$  und  $O^2$  auf.

Hat man bei einer Klassifizierung mittels kürzester Entfernung drei Kanäle ( $K = 3$ ), so sind räumliche Strecken zu berechnen; ist  $K = 4$ , sind es vierdimensionale Strecken usw.<sup>1</sup>

Im zweidimensionalen Fall ( $K = 2$ ) sind die Diskriminatoren, also die Trennungslinien, die die  $g_1g_2$ -Ebene in die Bereiche für die verschiedenen Objektklassen zerlegen, Streckensymmetralen der Strecken zwischen den Schwerpunkten  $O_s^i$ . Im Bild 6.8-4c sind diese Streckensymmetralen angedeutet. Im dreidimensionalen Fall ( $K = 3$ ) sind die Diskriminatoren Ebenen, die den  $g_1g_2g_3$ -Raum zerlegen; im 4-, 5-dimensionalen etc. Raum sind die Diskriminatoren sog. Hyperebenen.

Aufgabe 6.8-1: Man vervollständige im Bild 6.8-4c die Streckensymmetralen. Die Streckensymmetralen bilden ein Liniennetz, das die  $g_1g_2$ -Ebene in die Bereiche für die vier Objektklassen  $O^1$ ,  $O^2$ ,  $O^3$  und  $O^4$  unterteilt.

<sup>1</sup> Um Rechenzeiten zu sparen, wird man allerdings nicht die Strecken sondern nur die Quadrate der Strecken berechnen. Folgende Darstellung für das Quadrat der Strecken erlaubt eine weitere Reduktion der Rechenzeiten:  $(\mathbf{g} - \bar{\mathbf{g}}^i)^T(\mathbf{g} - \bar{\mathbf{g}}^i) = \mathbf{g}^T\mathbf{g} - 2\mathbf{g}^T\bar{\mathbf{g}}^i + \bar{\mathbf{g}}^{iT}\bar{\mathbf{g}}^i$ . Der erste Summand ist für das zu klassifizierende Bildelement gleich und kann deshalb weggelassen werden. Der letzte Summand ist für jede Objektklasse nur einmal zu berechnen.

a)

78	104	96	89	113	128	110	107	42	49	54	46	42	53	56	63	73	65	68
69	109	84	85	116	121	104	52	53	71	75	59	54	49	53	57	67	66	53
63	92	113	94	64	107	115	68	57	64	97	63	58	66	59	68	56	63	56
71	96	115	101	114	116	71	76	58	71	81	74	50	83	72	77	68	56	68
83	104	106	77	92	99	63	59	61	67	73	67	43	60	58	62	64	69	86
91	93	99	119	103	57	49	56	64	76	61	72	59	80	73	76	78	74	82
97	130	124	112	106	46	53	64	73	88	84	97	75	79	76	81	85	79	136
100	116	101	104	163	59	63	66	79	99	93	101	86	88	92	133	144	127	132
67	168	177	161	158	161	173	165	168	97	92	101	96	129	137	144	128	131	137
172	187	163	137	176	157	141	159	174	191	173	156	127	133	154	152	141	148	144
181	199	185	164	178	187	163	179	183	175	162	68	132	138	156	139	148	137	149
192	205	189	195	186	193	188	181	176	169	93	86	97	158	152	156	142	140	154
187	193	206	209	181	184	179	168	164	170	92	101	113	151	138	154	147	155	144
188	181	187	188	191	195	189	173	184	83	104	108	119	158	162	148	146	134	150
196	189	187	203	166	211	208	195	199	74	112	124	126	111	148	164	156	143	151
203	201	184	198	171	196	213	202	86	93	111	128	131	108	146	144	150	136	132
194	187	163	165	177	189	201	193	102	106	117	124	118	111	114	128	143	140	141
172	183	178	168	163	177	185	92	104	113	126	111	124	100	118	133	124	129	149
201	178	206	159	163	167	173	98	110	118	123	116	134	128	143	138	141	134	137

b)

54	61	63	67	74	78	69	82	169	178	180	171	183	176	171	182	169	182	176
63	74	59	52	75	69	78	173	178	171	189	192	181	173	188	176	191	179	183
43	64	61	46	43	74	77	166	162	174	172	189	187	166	162	177	183	187	192
31	69	64	48	61	70	182	178	169	192	179	164	172	153	172	169	172	169	178
74	66	55	45	58	82	186	171	177	187	176	168	187	156	163	176	163	177	186
68	55	54	59	71	179	192	187	188	173	166	149	179	169	181	188	177	179	184
81	86	63	66	84	171	189	174	183	168	150	164	176	182	187	191	178	189	158
72	84	72	78	84	168	182	187	179	173	177	158	162	176	183	171	147	151	151
33	63	76	82	73	75	83	78	74	171	168	161	160	148	156	152	158	142	144
76	79	71	69	78	84	62	76	84	81	79	73	178	163	157	167	153	141	146
84	92	79	83	92	88	75	62	83	69	76	31	172	158	151	162	144	136	134
63	71	83	78	69	71	78	59	67	74	35	38	57	162	158	154	146	139	133
57	69	89	75	67	87	63	68	73	79	62	52	54	166	157	153	138	144	142
49	52	59	74	79	61	51	55	68	71	69	58	73	153	146	135	146	159	151
46	59	91	81	70	66	57	59	53	59	66	78	84	73	157	154	162	164	156
49	53	62	72	57	52	63	72	76	68	74	71	80	83	162	173	168	166	162
58	61	77	63	68	71	68	69	77	71	77	80	83	82	84	156	162	163	147
54	53	56	51	66	57	61	73	80	78	72	77	80	87	83	173	164	154	149
51	68	49	69	88	63	56	75	62	83	79	67	68	84	76	157	168	153	159

Bild 6.8-4a,b: Bildmatrix  $\underline{G}_1$  im Kanal 1 (a) und Bildmatrix  $\underline{G}_2$  im Kanal 2 (b) mit vier Trainingsgebieten

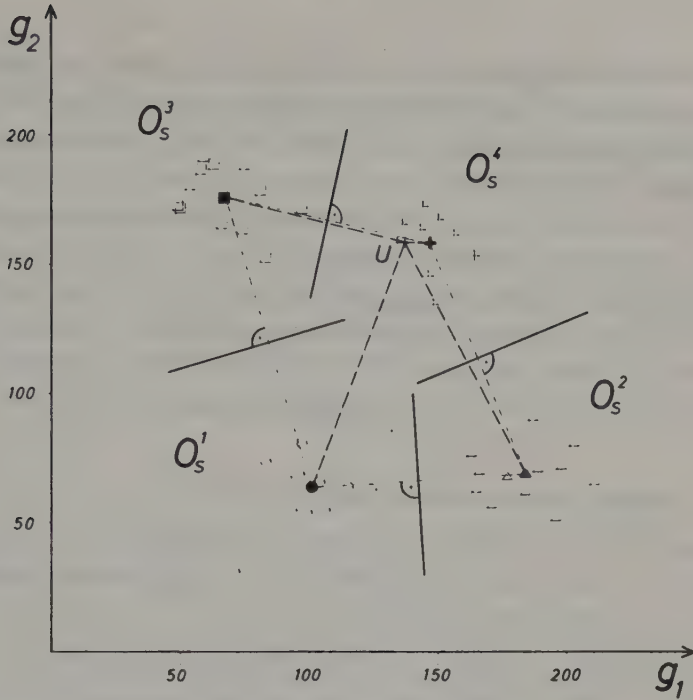


Bild 6.8-4c: Bildelemente und Schwerpunkte  $O_S^i$  von vier Trainingsgebieten und ein zu klassifizierender Punkt  $U$  im  $g_1g_2$ -Merkmalsraum

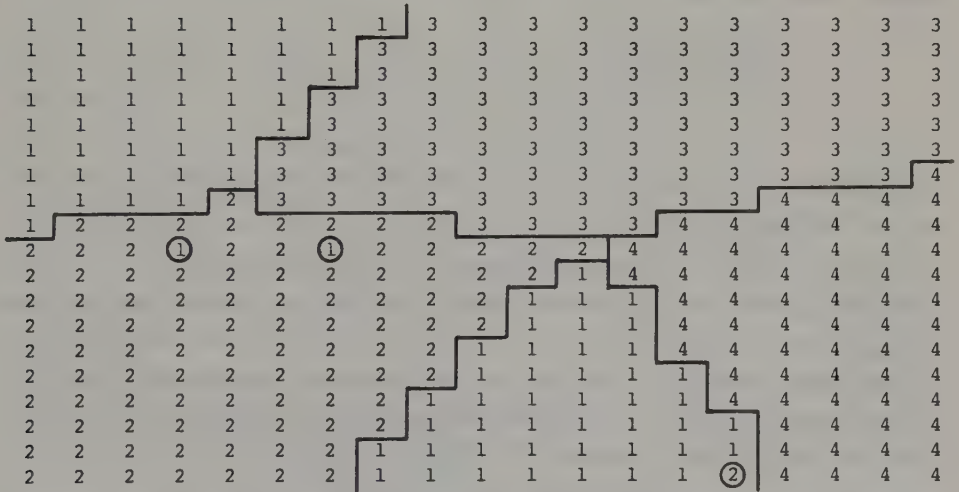


Bild 6.8-4d: Klassifizierungsergebnis mittels kürzester Entfernung in der  $XY$ -Ebene

Der wesentliche Nachteil der Klassifizierung mittels kürzester Entfernung ist einerseits der beachtliche Rechenaufwand und zum anderen die unzureichende statistische Begründung. So wird z.B. bei dieser Klassifizierungsmethode nicht berücksichtigt, daß die Punktwolken der verschiedenen Trainingsgebiete in der Praxis sehr unterschiedliche Streuungen aufweisen. Mit Kreisen um die Schwerpunkte, deren Radien der Streuung der Bildelemente des jeweiligen Trainingsgebietes angepaßt werden könnten, könnte man der Statistik allerdings Rechnung tragen (Haberäcker, 1985). Bildpunkte, die in der  $g_1g_2$ -Ebene außerhalb der Kreisflächen liegen, würden als nichtklassifizierbar deklariert und einer sog. Zurückweisungsklasse zugewiesen.

### 6.8.3 Klassifizierung mittels Quader (hyperbox)

Ein etwas qualifizierteres Klassifizierungsverfahren ist die sogenannte Quadermethode. Sie spielt wegen des sehr geringen Rechenaufwandes in der Praxis eine beachtliche Rolle.

Die Quadermethode beginnt - wie die Klassifizierung mittels kürzester Entfernung - ebenfalls mit dem Bilden der Mittelwerte  $\bar{g}_k^i$  (6.8-1) für alle Objektklassen  $O^i$  aus den Bildelementen der Trainingsgebiete, und zwar getrennt für jeden Kanal  $k = 1(1)K$ . Aus der Sicht der Statistik bietet sich an, zu jedem Mittelwert  $\bar{g}_k^i$  auch seine Standardabweichung  $\sigma_k^i$  nach der bekannten Formel zu berechnen:

$$\sigma_k^i = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^N (g_{k,l}^i - \bar{g}_k^i)^2}{N - 1}} \quad \begin{array}{l} k = 1(1)K \\ i = 1(1)I \end{array} \quad (6.8-3)$$

Die Indizes  $i$  und  $k$  sowie die Größe  $N$  wurden im Anschluß an die Gleichung (6.8-1) bereits definiert.

Die Klassifizierung soll zunächst anhand des zweikanaligen Bildes 6.8-4a,b erläutert werden: Um jeden Schwerpunkt  $O_s^i$  in der  $g_1g_2$ -Ebene legt man ein Rechteck, dessen halbe Seiten ein Vielfaches (Faktor  $h$ ) der Standardabweichungen sind. Im Bild 6.8-5a sind die Rechtecke für das Testbeispiel ( $h = 2.5$ ) eingetragen, wobei für die Objektklasse  $O^1$  auch die mit den Standardabweichungen definierten Normalverteilungen angegeben sind.

Ein zu klassifizierendes Bildelement wird nun jener Objektklasse zugewiesen, innerhalb deren Rechteck es liegt. Liegt ein Bildelement in keinem der Rechtecke, so wird dieses Bildelement als unklassifizierbar betrachtet und



in die sogenannte Zurückweisungsklasse eingereicht. (Im Klassifizierungsergebnis (Bild 6.8-5b) scheint ein Bildelement (Code = 0) in der Zurückweisungsklasse auf.) Die Zurückweisungsklasse kann verkleinert werden, indem man die Rechtecke vergrößert, d.h. den h-Faktor vergrößert. In der Praxis variiert der h-Faktor zwischen 2.0 und 3.5, wobei mit wachsendem K, also wachsender Dimensionalität, der h-Faktor größer zu wählen ist.

Aufgabe 6.8-2: Man überlege sich die Begründung für die letzte Aussage. Hinweis: Die Anzahl K der Dimensionen kann man als Freiheitsgrad einer  $\chi^2$ -Verteilung interpretieren (siehe 6.8.4.1).

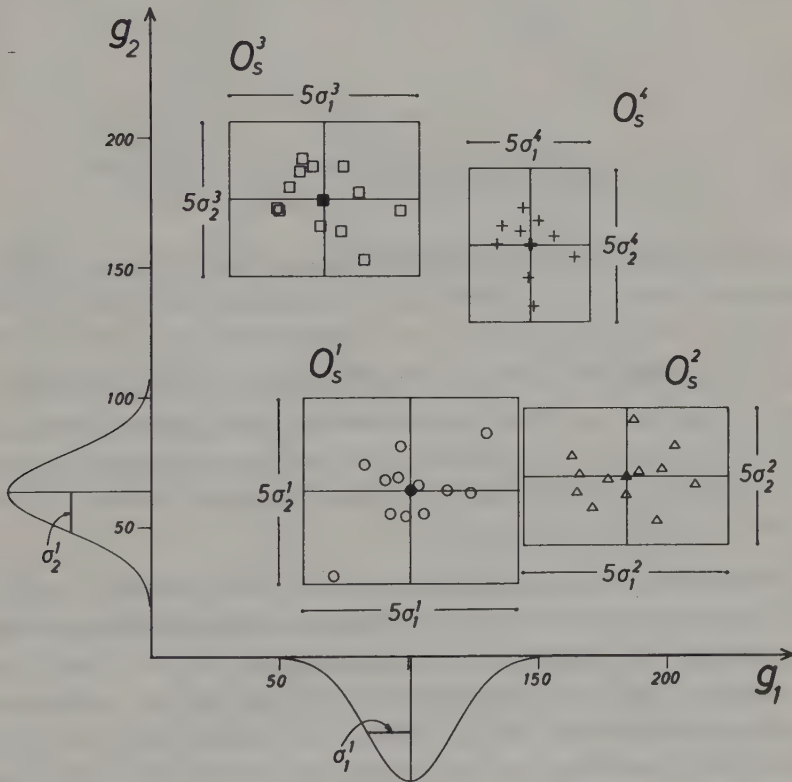


Bild 6.8-5a: Bildelemente und Rechtecke mit den 2.5-fachen Standardabweichungen für die Trainingsgebiete (Bild 6.8-4a,b)

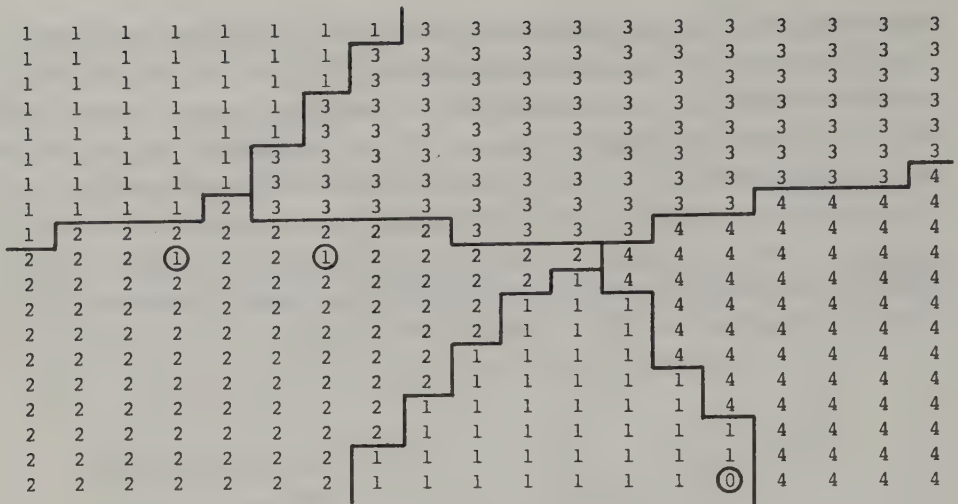


Bild 6.8-5b: Klassifizierungsergebnis mit Quadermethode  
in der XY-Ebene

Zu große h-Faktoren führen zu Überlappungen benachbarter Rechtecke. Solche Mehrdeutigkeiten können nur mit größerem numerischen Aufwand behoben werden, z.B. dadurch, daß man die in die Überlappungsbereiche fallenden Bildelemente mit der Methode der "maximalen Mutmaßlichkeit" (6.8.5) behandelt.

Zum Schluß ist auch auf die Verallgemeinerung von zwei auf K Kanäle hinzuweisen. Bei 3-kanaligen Bildern gibt es für jede Objektklasse drei Standardabweichungen, die zur Definition 3-dimensionaler Quader benutzt werden; 4 Kanäle liefern 4-dimensionale Quader usw.

Neben dem Problem der überlappenden Quader hat die Quadermethode noch den Nachteil, daß die Abhängigkeiten, also die Korrelationen zwischen den Grauwerten der verschiedenen Kanäle, nicht berücksichtigt werden können. Man muß daher entweder diese oft vorhandenen Korrelationen mit der sogenannten Hauptkomponententransformation (6.8.4) vorher beseitigen oder die Klassifizierung mittels maximaler Mutmaßlichkeit (6.8.5) benutzen, die aber einen wesentlich höheren Rechenaufwand erfordert.

Aufgabe 6.8-3: Man klassifiziere das zweikanalige Bild 6.8-4a,b mit einem h-Faktor von 2.25 und vergleiche das Ergebnis mit Bild 6.8-5b.

## 6.8.4 Statistische Analyse von Multispektralbildern

### 6.8.4.1 Statistische Beschreibung einer Objektklasse

Wir beschränken uns zunächst auf die Bildelemente einer Objektklasse  $O^i$  in  $K$  verschiedenen Kanälen. Einige statistische Parameter haben wir bereits kennengelernt. Sie sollen der Vollständigkeit wegen wiederholt werden, wobei - wenn keine Unterscheidung erforderlich ist - auf den Index  $i$  zur Kennzeichnung der Objektklasse  $O^i$  verzichtet wird:

Mittelwert (6.8-1) bzw. Erwartungswert der Grauwerte in jedem Kanal:

$$\bar{g}_k = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N g_{k,l} \quad k = 1(1)K \quad (6.8-4)$$

$k \hat{=}$  Index für den jeweiligen Kanal, der von 1 in Stufen von 1 bis  $K$  läuft.

$N \hat{=}$  Anzahl der Bildelemente in der zu beschreibenden Objektklasse, wobei der Index  $l$  in Stufen von 1 bis  $N$  läuft.

Die Mittelwerte  $\bar{g}_k$  aller  $K$  Kanäle können zu einem Vektor  $\bar{g}$  zusammengefaßt werden (6.8-2):

$$\bar{g} = (g_1 \dots g_k \dots g_K)^T \quad (6.8-5)$$

Anstelle der Standardabweichung (6.8-3) gehen wir nun zur allgemeineren Varianz-Kovarianzmatrix  $C$  über:

$$C = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \dots & \sigma_{1K} \\ \vdots & & \vdots \\ \sigma_{1K} & \dots & \sigma_K^2 \end{pmatrix} \quad (6.8-6)$$

In der Hauptdiagonale treten die Varianzen  $\sigma_k^2$ , also die Quadrate der Standardabweichungen, auf. Die Varianz  $\sigma_1^2$  des Kanales 1 lautet z.B. (6.8-3):

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{l=1}^N (g_{1,l} - \bar{g}_1)^2 \quad (6.8-7)$$

Außerhalb der Hauptdiagonalen sind in der Matrix  $C$  die Kovarianzen angeordnet. Die Kovarianz zwischen den Kanälen 1 und 2 ergibt sich z.B. wie folgt aus den Grauwerten  $g_1$  und  $g_2$  unter Benützung der Mittelwerte  $\bar{g}_1$  und  $\bar{g}_2$ :

$$\sigma_{12} = \frac{1}{N-1} \sum_{l=1}^N (g_{1,l} - \bar{g}_1)(g_{2,l} - \bar{g}_2) \quad (6.8-8)$$

Für das eingeführte zweikanalige Testbeispiel (Bild 6.8-4a,b) lautet die Varianz-Kovarianzmatrix für die Objektklasse  $O^4$  :

$$\underline{C} = \begin{pmatrix} 92.26 & -24.29 \\ -24.29 & 107.27 \end{pmatrix} \quad (6.8-9)$$

Zum Vergleich ist noch die Varianz-Kovarianzmatrix ebenfalls für die Objektklasse  $O^4$  angegeben, allerdings unter der Annahme, daß für den Kanal 2 (irrtümlich) die gleichen Grauwerte wie für den Kanal 1 vorliegen:

$$\underline{C} = \begin{pmatrix} 92.26 & 92.26 \\ 92.26 & 92.26 \end{pmatrix} \quad (6.8-10)$$

Man sieht aus (6.8-9), daß die Kanäle 1 und 2 bei der Objektklasse  $O^4$  etwas, und zwar negativ, miteinander korreliert sind; dagegen liegt - wie nicht anders zu erwarten - bei (6.8-10) eine totale Korrelation vor. Eine starke positive Korrelation von zwei Kanälen äußert sich in der  $g_1g_2$ -Ebene dadurch, daß die Punkte entlang einer Geraden durch den Koordinatenursprung aufgefädelt sind; bei einer starken negativen Korrelation verläuft diese Gerade orthogonal zur Ursprungsgeraden. (Im Bild 6.8-3 sieht man, daß die Objektklasse  $O^1$  verhältnismäßig stark positiv und die Objektklasse  $O^4$  etwas negativ korreliert ist.)

Anstelle der Kovarianzen - z.B.  $\sigma_{12}$  - geht man häufig auf den Korrelationskoeffizienten über. Er lautet z.B. für die Kanäle 1 und 2:

$$\rho_{12} = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} \quad (6.8-11)$$

Der Korrelationskoeffizient  $\rho_{12}$  zur Matrix (6.8-9) beträgt

$$\rho_{12} = -24.29 / (9.61 \cdot 10.36) = -0.24^1$$

und zur Matrix (6.8-10)

$$\rho_{12} = 92.26 / (9.61 \cdot 9.61) = 1.00.$$

<sup>1</sup> Da man anstelle der Varianzen und Kovarianzen in erster Linie an den Standardabweichungen und Korrelationskoeffizienten interessiert ist, wird die Varianz-Kovarianzmatrix (6.8-6) häufig umgeformt in eine Matrix mit den Standardabweichungen entlang der Hauptdiagonalen und den Korrelationskoeffizienten außerhalb der Hauptdiagonalen. An die Stelle der Matrix (6.8-9) tritt deshalb:

$$\begin{pmatrix} 9.61 & -0.24 \\ -0.24 & 10.36 \end{pmatrix}$$

Aufgabe 6.8-4: Man nehme die Grauwerte der Objektklasse  $O^4$  vom Bild 6.8-4a und erzeuge daraus ein Negativ (6.6.1). Anschließend ist der Korrelationskoeffizient zwischen dem Positiv und dem Negativ zu berechnen.

Mit dem Vektor  $\bar{g}$  (6.8-5), in dem für jede Objektklasse die Mittelwerte aller Kanäle zusammengefaßt sind, und der Varianz-Kovarianzmatrix  $\underline{C}$  (6.8-6) kann die Wahrscheinlichkeitsdichte  $f(g)$  in der Form einer K-dimensionalen Normalverteilung (z.B. Mikhail, 1976) angegeben werden:

$$f(g) = \left( \frac{1}{(2\pi)^{\frac{K}{2}} \sqrt{|\underline{C}|}} \right) \exp \left( -\frac{1}{2} (g - \bar{g})^T \underline{C}^{-1} (g - \bar{g}) \right) \quad (6.8-12)$$

Bei dieser multivariablen Normalverteilung bedeuten:

- $g$   $\hat{=}$  K-dimensionale Zufallsvariable, d.h.  
Grauwertvektor  $g = (g_1 \dots g_k \dots g_K)^T$  eines beliebigen Bildelementes innerhalb der zu beschreibenden Objektklasse  $O^i$ .
- $\exp$   $\hat{=}$  Exponent von e.
- $|\underline{C}|$   $\hat{=}$  Determinante der Varianz-Kovarianzmatrix
- $\underline{C}^{-1}$   $\hat{=}$  Inverse der Varianz-Kovarianzmatrix

Die Formel (6.8-12) ersetzt eine Punktwolke durch eine analytische Funktion. Sie soll im folgenden in Abhängigkeit der Anzahl K der Kanäle näher erläutert werden:

Ein Kanal: Gleichung (6.8-12) spezialisiert sich für  $K = 1$  (z.B. Schwarzweißbild) wie folgt:

$$f(g) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp \left( -\frac{(g - \bar{g})^2}{2\sigma^2} \right) \quad (6.8-13)$$

Mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsdichte  $f(g)$  kann für das h-fache der Standardabweichung  $\sigma$ , d.h. für den Ausdruck

$$\frac{(g - \bar{g})^2}{\sigma^2} \leq h^2 \quad (6.8-14)$$

die Wahrscheinlichkeit  $P(h)$  dafür angegeben werden, wieviele Bildelemente mit ihren Grauwerten  $g$  innerhalb des Intervalles  $\bar{g} - h \cdot \sigma < g < \bar{g} + h \cdot \sigma$  liegen. Man erhält diese Wahrscheinlichkeit durch Bilden des Integrales:

$$P(h) = \int_{-h \cdot \sigma}^{+h \cdot \sigma} f(g) dg \quad (6.8-15)$$

Das Ergebnis der Integration ist in Büchern der Statistik und Ausgleichungsrechnung als integrale Verteilungsfunktion der eindimensionalen Nor-



malverteilung oder der  $\chi^2$ -Verteilung mit dem Freiheitsgrad 1 tabelliert.

Einige Werte:

h	1.00	1.65	1.96	2.00	2.58	3.00
P(h)in%	68.3	90.0	95.0	95.4	99.0	99.7

(6.8-16)

Für  $h = \infty$  beträgt die integrale Verteilungsfunktion  $P(h) = 1$ , d.h. 100 %.

Zahlenbeispiel: Mit den insgesamt 65 Grauwerten der Bildelemente der Objektklasse  $O^4$  im Kanal 1 (Bild 6.8-4a) ergibt sich mit (6.8-4) ein Mittelwert  $\bar{g}$  von:  $\bar{g}_1^4 = 9272/65 = 143$ . Die dazugehörige Standardabweichung  $\sigma_1^4$  entsprechend (6.8-7) lautet:  $\sigma_1^4 = \sqrt{5905/64} = \pm 9.61$ . Damit erhält man die Wahrscheinlichkeitsdichte für die Objektklasse  $O^4$  im Kanal 1 (6.8-13):

$$f(g_1^4) = \frac{1}{24.1} \exp \left( - \frac{(g_1^4 - 143)^2}{185} \right)$$

Die entsprechenden Werte für die Objektklasse  $O^3$  (Bild 6.8-4a) lauten:

$$\bar{g}_1^3 = 6981/102 = 68$$

$$\sigma_1^3 = \sqrt{20553/101} = \pm 14.27$$

$$f(g_1^3) = \frac{1}{35.8} \exp \left( - \frac{(g_1^3 - 68)^2}{407} \right)$$

Im Bild 6.8-6 sind die Funktionen der Wahrscheinlichkeitsdichte für die Objektklasse  $O^3$  und  $O^4$  dargestellt. Außerdem sind die Grauwertintervalle angegeben, innerhalb deren 95% der Bildelemente liegen. Man kann diese Intervalle mit Hilfe des Mittelwertes  $\bar{g}$ , der Standardabweichung  $\sigma$  und der Tab. (6.8-16) berechnen:

Objektklasse  $O^3$ :  $68 - 1.96 \cdot 14.27 < g_1^3 < 68 + 1.96 \cdot 14.27$

Objektklasse  $O^4$ :  $143 - 1.96 \cdot 9.61 < g_1^4 < 143 + 1.96 \cdot 9.61$

Man sieht, daß bei der Objektklasse  $O^4$  95% der Bildelemente innerhalb eines wesentlich kleineren Grauwertintervalles liegen als bei der Objektklasse  $O^3$ .

Aufgabe 6.8-5: Man überprüfe mit dem  $\chi^2$ -Anpassungstest, der in Statistiklehrbüchern zu finden ist, ob die Häufigkeitsverteilung der 65 Grauwerte der Objektklasse  $O^4$  mit genügender Zuverlässigkeit durch die berechnete Normalverteilung angenähert werden darf.

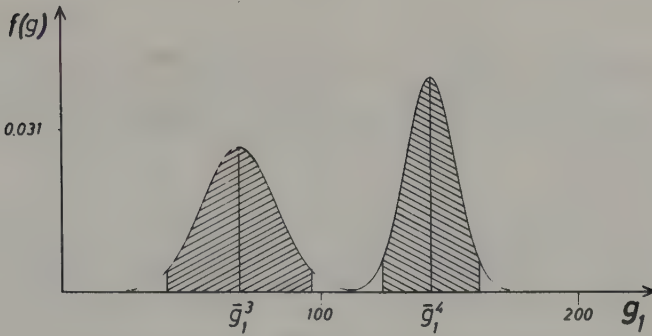


Bild 6.8-6: Wahrscheinlichkeitsdichte im Kanal 1 für die Objektklassen  $O^3$  und  $O^4$  und Grauwertintervalle, innerhalb deren 95% der Bildelemente liegen

Zwei Kanäle: Für  $K = 2$  lautet die Gleichung (6.8-12):

$$f \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\sigma_1^2 \sigma_2^2 - \sigma_{12}^2}} \exp \left\{ - \frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2}{2(\sigma_1^2 \sigma_2^2 - \sigma_{12}^2)} \left[ \frac{(g_1 - \bar{g}_1)^2}{\sigma_1^2} - 2\sigma_{12} \frac{(g_1 - \bar{g}_1)(g_2 - \bar{g}_2)}{\sigma_1^2 \sigma_2^2} + \frac{(g_2 - \bar{g}_2)^2}{\sigma_2^2} \right] \right\} \quad (6.8-17)$$

Die Linien konstanter Wahrscheinlichkeitsdichte  $f \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \end{pmatrix}$  sind bei zweikanaligen Bildern Ellipsen mit den Mittelpunktskoordinaten  $\bar{g}_1$  und  $\bar{g}_2$  (Bild 6.8-7).

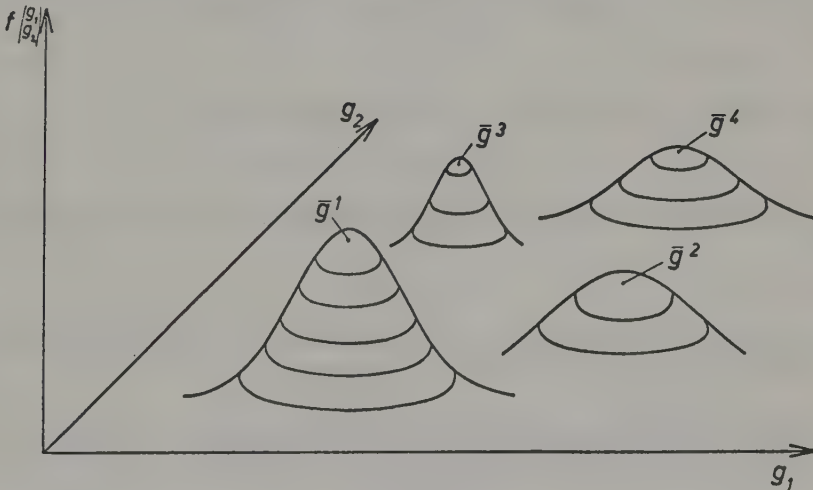


Bild 6.8-7: Wahrscheinlichkeitsdichte von vier Objektklassen in zwei Kanälen

Für eine Ellipse

$$\frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2}{(\sigma_1^2 \sigma_2^2 - \sigma_{12}^2)} \left[ \frac{(g_1 - \bar{g}_1)^2}{\sigma_1^2} - 2\sigma_{12} \frac{(g_1 - \bar{g}_1)(g_2 - \bar{g}_2)}{\sigma_1^2 \sigma_2^2} + \frac{(g_2 - \bar{g}_2)^2}{\sigma_2^2} \right] \leq h^2 \quad (6.8-18)$$

soll nun auch die Wahrscheinlichkeit  $P(h)$  dafür angegeben werden, wieviele Bildelemente einer Objektklasse mit ihren Grauwerten  $\underline{g} = (g_1, g_2)^T$  innerhalb der durch  $h$  in der Gleichung (6.8-18) dimensionierten Ellipse liegen.

Vor Beantwortung dieser Frage sind zunächst einige mathematische Umformungen erforderlich, die das Ziel haben, die Varianz-Kovarianzmatrix  $\underline{C}$  (6.8-6) in eine Diagonalmatrix umzuformen. Da die Varianz-Kovarianzmatrix  $\underline{C}$  positiv definit ist, kann durch Multiplikation mit der orthogonalen Drehmatrix  $\underline{R}$  die gewünschte Umformung erreicht werden, wobei die Betrachtungen zunächst auf zwei Kanäle beschränkt bleiben:

$$\hat{\underline{C}} = \begin{pmatrix} \hat{\sigma}_1^2 & 0 \\ 0 & \hat{\sigma}_2^2 \end{pmatrix} = \underline{R}^T \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} \\ \sigma_{12} & \sigma_2^2 \end{pmatrix} \underline{R} = \underline{R}^T \underline{C} \underline{R} \quad (6.8-19)$$

Die Drehmatrix  $\underline{R}$  enthält die normierten Eigenvektoren der Matrix  $\underline{C}$ .

Zahlenbeispiel: Die Varianz-Kovarianzmatrix  $\underline{C}$  der Objektklasse  $O^4$  (6.8-9) ist in eine Diagonalmatrix  $\hat{\underline{C}}$  umzuformen. Das charakteristische Polynom der zur Bestimmung der Eigenwerte  $\lambda$  lautet für eine 2x2-Matrix:

$$\lambda^2 - \lambda \cdot \text{spur} \underline{C} + |\underline{C}| = 0 \quad (6.8-20)$$

Mit den Zahlenwerten der Matrix (6.8-9) lautet (6.8-20):

$$\lambda^2 - \lambda(92.26 + 107.27) + (92.26 \cdot 107.27 - 24.29^2) = 0$$

Die Auflösung der quadratischen Gleichung liefert die beiden Eigenwerte  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$ :

$$\lambda_1 = 74.34$$

$$\lambda_2 = 125.19$$

Mit den beiden Eigenwerten  $\lambda_k$  ( $k=1,2$ ) erhalten wir die beiden Eigenvektoren  $\underline{r}'_k = (r'_{1k}, r'_{2k})^T$  aus der Gleichung:

$$(\underline{C} - \lambda_k \underline{E}) \underline{r}'_k = 0 \quad \underline{E} = \hat{\text{Einheitsmatrix}} \quad (6.8-21)$$

Zahlenwerte für den Eigenvektor  $\underline{r}'_1$  mit  $\lambda_1$ :

$$\begin{pmatrix} 92.26 - 74.34 & -24.29 \\ -24.29 & 107.27 - 74.34 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r'_{11} \\ r'_{21} \end{pmatrix} = 0$$

Lösung des homogenen Gleichungssystems entweder mit der ersten oder zweiten Zeile:

$$r'_{11} = 1 \quad r'_{21} = 0.7377 \text{ bzw. } \underline{r}'_1 = (1, 0.7377)^T$$

Normierung des Vektors  $\underline{r}'_1$ :  $\underline{r}_1 = (0.8047, 0.5936)^T$

Auf die gleiche Weise erhalten wir den normierten Eigenvektor  $\underline{r}_2$  mit  $\lambda_2$ :  $\underline{r}_2 = (-0.5936, 0.8047)^T$ . Damit ist die Drehmatrix  $\underline{R}$  bekannt, aus der auch der Winkel  $\alpha$  der gedrehten Hauptachsen der Ellipse entnommen werden kann (Bild 6.8-8):

$$\underline{R} = (\underline{r}_1, \underline{r}_2) = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.8047 & -0.5936 \\ 0.5936 & 0.8047 \end{pmatrix} \Rightarrow \alpha = 40.5 \text{ gon} \quad (6.8-22)$$

Mit der bekannten Drehmatrix  $\underline{R}$  kann nun die Matrix  $\underline{C}$  (6.8-9) in die Diagonalmatrix  $\underline{\hat{C}}$  umgeformt werden:

$$\underline{R}^T \underline{C} \underline{R} = \begin{pmatrix} 0.8047 & 0.5936 \\ -0.5936 & 0.8047 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 92.26 & -24.29 \\ -24.29 & 107.27 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.8047 & -0.5936 \\ 0.5936 & 0.8047 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 74.34 & 0 \\ 0 & 125.19 \end{pmatrix} = \underline{\hat{C}} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \quad (6.8-23)$$

Wir sehen aus (6.8-20) und (6.8-23), daß die Hauptachsen der Ellipsen gleicher Wahrscheinlichkeitsdichte (für  $h = 1$ ) den Wurzeln der Eigenwerte  $\lambda_k$  entsprechen. Mit der Drehmatrix  $\underline{R}$  können auch die Grauwerte  $\underline{g} = (g_1, g_2)^T$  in neue Grauwerte  $\underline{\hat{g}} = (\hat{g}_1, \hat{g}_2)^T$  überführt werden, wobei im Bild 6.8-8 angedeutet ist, daß der Ursprung des neuen Koordinatensystems in den Schwerpunkt der Punktwolke gelegt wurde.

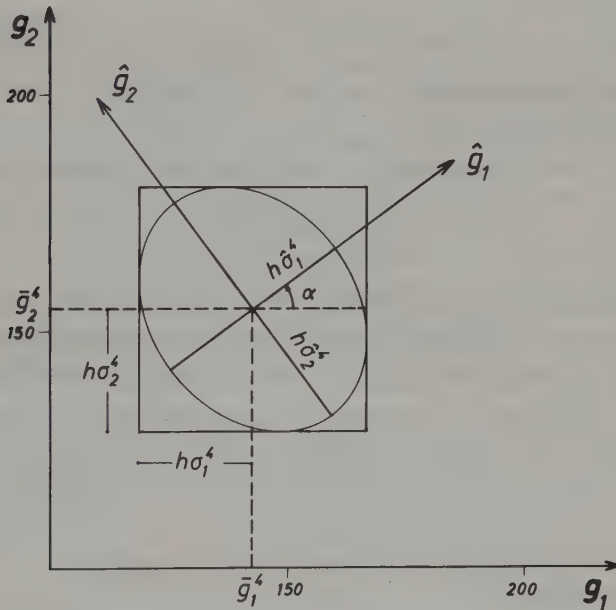


Bild 6.8-8: Ellipse gleicher Wahrscheinlichkeitsdichte und das sie umschreibende Rechteck

Nachdem anstelle der voll besetzten Matrix  $\underline{C}$  die Diagonalmatrix  $\underline{\hat{C}}$  in der Gleichung (6.8-18) benutzt werden kann, vereinfacht sich die Beziehung für die Wahrscheinlichkeit  $P(h)$ , wieviele Bildelemente einer Objektklasse mit ihren Grauwerten  $\underline{g}$  innerhalb der  $h$ -fachen (Standard-)Ellipse mit den

Hauptachsen  $\hat{\sigma}_1$  und  $\hat{\sigma}_2$  liegen (Bild 6.8-8), wie folgt:

$$\left( \frac{\hat{g}_1^2}{\hat{\sigma}_1^2} + \frac{\hat{g}_2^2}{\hat{\sigma}_2^2} \right) \leq h^2 \quad (6.8-24)$$

Die Beziehung (6.8-24) stellt die Summe der Quadrate von zwei normierten normalverteilten Zufallsvariablen dar. Die integrale Verteilungsfunktion  $P(h)$ , abhängig vom  $h$ -fachen der Standardellipse, ist aus der  $\chi^2$ -Verteilung mit zwei Freiheitsgraden zu ermitteln. Tab. (6.8-25) enthält einige Werte von  $P(h)$ :

$h$	1.00	2.00	2.15	2.45	3.00	3.04
$P(h)$ in %	39.4	86.5	90.0	95.0	98.9	99.0

(6.8-25)

Auch die zweidimensionale integrale Verteilungsfunktion  $P(h)$  wird 1, wenn  $h$  gegen Unendlich geht.

Zahlenbeispiel: Für die Objektklasse  $O^4$  wurden bereits die erforderlichen Vorarbeiten teilweise geleistet: der Mittelpunkt der Ellipsen mit konstanter Wahrscheinlichkeitsdichte liegt bei  $\bar{g}_1 = 143$ ,  $\bar{g}_2 = 155$ . Die beiden Hauptachsen betragen  $\hat{\sigma}_1 = 8.6$ ,  $\hat{\sigma}_2 = 11.2$ . Diese Hauptachsen sind gegenüber dem  $g_1g_2$ -Koordinatensystem um den Winkel  $\alpha = 40.5$  gon verdreht (Bild 6.8-8). 95% aller Bildelemente liegen laut Tab. 6.8-25 innerhalb der Ellipse mit den Hauptachsen  $2.45 \cdot 8.6 = 21.1$  und  $2.45 \cdot 11.2 = 27.4$ .

Aufgabe 6.8-6: Wie ist die Ellipse dimensioniert innerhalb der 90% aller Bildelemente liegen? Man zeichne sie in das Bild 6.8-8 ein.

Drei und mehr Kanäle: Bei drei Kanälen ( $K = 3$ ) sind die durch die Gleichung (6.8-12) beschriebenen Flächen gleicher Wahrscheinlichkeitsdichte  $f(\underline{g})$  mit den Mittelpunktskordinaten  $\bar{g}_1, \bar{g}_2, \bar{g}_3$  Ellipsoide. Die Wahrscheinlichkeit  $P(h)$ , wieviele Bildelemente innerhalb des  $h$ -fachen Standardellipsoides

$$(\underline{g} - \bar{\underline{g}})^T \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_2^2 & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_3^2 \end{pmatrix}^{-1} (\underline{g} - \bar{\underline{g}}) \leq h^2 \quad (6.8-26)$$

liegen, folgt aus einer  $\chi^2$ -Verteilung mit drei Freiheitsgraden. Die integrale Verteilungsfunktion  $P(h)$  in Abhängigkeit des  $h$ -fachen Standardellipsoides ist in der Tab. (6.8-27) für einige Werte angegeben:



h	1.00	2.00	2.50	2.80	3.00	3.37
P(h) in %	19.9	73.8	90.0	95.0	97.1	99.0

(6.8-27)

Die auf das  $g_1g_2g_3$ -Koordinatensystem sich beziehenden Standardabweichungen  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  der Beziehung (6.8-26) und die Standardabweichungen  $\hat{\sigma}_1, \hat{\sigma}_2, \hat{\sigma}_3$ , die sich auf das  $\hat{g}_1\hat{g}_2\hat{g}_3$ -Koordinatensystem mit den Hauptachsen des Ellipsoides beziehen, hängen - wie im zweidimensionalen Fall ausführlich erläutert - wie folgt zusammen:

$$\hat{\underline{C}} = \begin{pmatrix} \hat{\sigma}_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \hat{\sigma}_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \hat{\sigma}_3^2 \end{pmatrix} = \underline{R}^T \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_2^2 & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_3^2 \end{pmatrix} \underline{R} = \underline{R}^T \underline{C} \underline{R} \quad (6.8-28)$$

Die Drehmatrix  $\underline{R}$  enthält wiederum die normierten Eigenvektoren der Matrix  $\underline{C}$ . Das charakteristische Polynom (6.8-20) zur Bestimmung der Eigenwerte  $\lambda$  ist in diesem Fall ein Polynom dritten Grades. Das homogene Gleichungssystem (6.8-21) kann durch Vorgabe einer Komponente (z.B.  $r_{11} = 1$ ) und Benutzung von zwei Gleichungen für die beiden anderen Komponenten gelöst werden. Aus der orthogonalen Matrix  $\underline{R}$  können in der bekannten Weise die drei Winkel entnommen werden (B 3.3), die die Hauptachsen des Ellipsoides gegenüber dem  $g_1g_2g_3$ -Koordinatensystem festlegen.

Aufgrund der bisherigen Erfahrungen kann der Leser den Sachverhalt auch auf mehr als drei Kanäle erweitern. Die integrale Verteilungsfunktion  $P(h)$  folgt aus einer  $\chi^2$ -Verteilung mit K Freiheitsgraden, die in Statistikbüchern tabelliert ist.

Aufgabe 6.8-7: Mit der Varianz-Kovarianzmatrix  $\underline{C}$  (6.8-10), die aus zwei Kanälen mit identischen Grauwerten entstanden ist, ist die zweidimensionale Wahrscheinlichkeitsdichte  $f(\underline{g})$  mittels Gleichung (6.8-12) aufzustellen. Hinweis: Da die Zweidimensionalität "künstlich" entstanden ist, darf es keine Lösung geben.

Aufgabe 6.8-8: Man gebe das charakteristische Polynom für eine 3x3-Matrix an.

#### 6.8.4.2 Statistische Beschreibung für alle Objektklassen

Die Wahrscheinlichkeitsdichte für eine Objektklasse  $O^i$  ist für K Kanäle mit der Gleichung (6.8-12) gegeben. Da in einem Multispektralbild in der Regel mehrere Objektklassen abgebildet sind, sind die einzelnen Dichtefunktionen  $f(\underline{g})^i$  noch mit den relativen Häufigkeiten  $p^i$  zu multiplizieren. Die relativen Häufigkeiten für jede Objektklasse ergeben sich aus:

$$p^i = \frac{N^i}{\sum_{i=1}^I N} \quad (6.8-29)$$

$N^i$   $\hat{=}$  Anzahl der Bildelemente in der Objektklasse  $O^i$   
 $i$   $\hat{=}$  Index für die jeweilige Objektklasse, wobei insgesamt  $I$  Objektklassen angenommen werden.

Die Wahrscheinlichkeitsdichten, die die Anzahl der Bildelemente in den verschiedenen Objektklassen berücksichtigen, werden mit  $f'(g)^i$  bezeichnet und ergeben sich aus:

$$f'(g)^i = p^i \cdot f(g)^i \quad (6.8-30)$$

Die Summe der integralen Verteilungsfunktionen mit den Wahrscheinlichkeitsdichten  $f'(g)$  aller Objektklassen ergibt 1 für  $h = \infty$ .

#### 6.8.4.3 Hauptkomponententransformation (principal components)

Die Verwendung verschiedener Kanäle eines Multispektralbildes für die Klassifizierung ist nur dann sinnvoll, wenn sich die Grauwerte der verschiedenen Kanäle auch tatsächlich signifikant unterscheiden. Es geht also um die Frage, inwieweit die Grauwerte von zwei und mehr Kanälen voneinander unabhängig sind. Während der Klassifizierung äußern sich solche Abhängigkeiten bei der in der Gleichung (6.8-12) auftretenden Inversionen der Varianz-Kovarianzmatrix  $\underline{C}$ . Total abhängige Kanäle führen zu einer singulären Matrix  $\underline{C}$ , sehr stark abhängige Kanäle zu einer schlecht konditionierten Matrix  $\underline{C}$ .

Um diese Probleme zu beheben und die Klassifizierung nur mit den unbedingt notwendigen Kanälen durchführen zu können, kann der eigentlichen Klassifizierung eine entsprechende statistische Analyse vorausgeschickt werden. Man wird zu diesem Zweck mit allen Bildpunkten eines Multispektralbildes  $\underline{G}$  für jeden Kanal  $k$  entsprechend der Gleichung (6.8-1) bzw. (6.8-4) jeweils einen Mittelwert  $\bar{g}_k^G$  und entsprechend der Gleichung (6.8-6) bzw. (6.8-8) eine  $K \times K$ -Varianz-Kovarianzmatrix  $\underline{C}^G$  berechnen. Anhand der Kovarianzen  $\sigma_{jk}^G$  - oder noch besser der Korrelationskoeffizienten  $\rho_{jk}^G$  (6.8-11) - kann dann entschieden werden, welche Kanäle infolge starker Korrelationen auszuscheiden sind.

Eine andere Lösung des Problems bietet die sogenannte Hauptkomponententransformation des Multispektralbildes. Darunter versteht man die Transformation der Grauwerte  $g_k$  in neue Grauwerte  $\hat{g}_k$ , wobei die Kovarianzen  $\hat{\sigma}_{jk}^G$  der transformierten Grauwerte verschwinden. Eine solche Transformation ha-

ben wir im Abschnitt 6.8.4.1 kennengelernt (siehe insbesondere die Gleichungen (6.8-19) bis (6.8-23)). Die Transformationsmatrix  $\underline{R}^G$ , die lediglich eine Drehung bewirkt, erhält man durch Ermittlung der Eigenwerte und der normierten Eigenvektoren der Varianz-Kovarianzmatrix  $\underline{C}^G$ . Die Koordinatenachsen der transformierten Grauwerte  $\hat{g}_k$  liegen parallel zu den Hauptachsen des K-dimensionalen Standardellipsoides der Varianz-Kovarianzmatrix  $\underline{C}^G$ .

Für die multispektrale Klassifizierung werden dann die Grauwerte  $\hat{g}_k$  der (gedrehten) Kanäle herangezogen. Nach einer Hauptkomponententransformation kann man aber auch die relevanten Kanäle leicht auswählen: Man benutzt jene Kanäle  $\hat{g}_k$ , zu denen die größten Standardabweichungen  $\hat{\sigma}_k^G$  bzw. die größten Eigenwerte  $\lambda_k^G$  gehören.

Als Beispiel einer Hauptkomponententransformation nehmen wir die ersten vier Kanäle einer TM-Aufnahme (Tab. 4.2-14), wobei in jedem Kanal die Verteilung der Grauwerte linear gestreckt wurde (6.6.1). Das Bild 6.8-9a zeigt die Schwarzweißbilder der vier Kanäle. Die Varianz-Kovarianzmatrix  $\underline{C}^G$  dieses 4-kanaligen Bildes lautet:

$$\underline{C}^G = \begin{pmatrix} 768 & 742 & 961 & -332 \\ 742 & 801 & 983 & -234 \\ 961 & 983 & 1333 & -518 \\ -332 & -234 & -518 & 1415 \end{pmatrix} \quad (6.8-31)$$

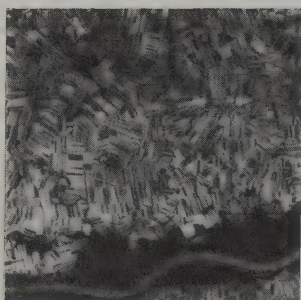
Das Bild 6.8-9a und die Varianz-Kovarianzmatrix (6.8-31) bringen zum Ausdruck, daß die ersten drei Kanäle, das sind die sichtbaren Spektralbereiche, stark miteinander korreliert sind und der vierte Kanal, das ist der nahe Infrarotbereich, nur geringfügig (negativ) mit den ersten drei Kanälen korreliert ist.

Nach der Hauptkomponententransformation hat die Matrix  $\hat{\underline{C}}^G$  folgendes Aussehen:

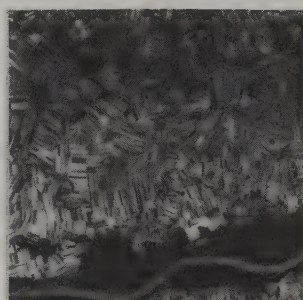
$$\hat{\underline{C}}^G = \begin{pmatrix} 33 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3061 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 47 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1174 \end{pmatrix} \quad (6.8-32)$$

Im Bild 6.8-9b sind die Schwarzweißbilder der neuen Kanäle wiedergegeben, wobei die Bilder nach der Größe der Standardabweichungen  $\hat{\sigma}_k^G$ , die sich aus den Hauptdiagonalelementen der Matrix (6.8-32) ergeben, geordnet wurden. Man erkennt den mit Verkleinerung der Standardabweichung  $\hat{\sigma}_k^G$  abnehmenden Informationsgehalt des 4-kanaligen Bildes  $\hat{\underline{G}}$ . In unserem Beispiel repräsentiert die 1. Hauptkomponente im wesentlichen die Information der ersten

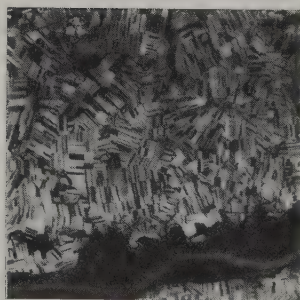
drei (im sichtbaren Bereich liegenden) TM-Kanäle, während die 2. Hauptkomponente ähnlich wie der Kanal 4 (infrarot) aussieht. Nach der 2. Hauptkomponente nimmt die Relevanz der Information abrupt ab. Im allgemeinen kommt man für eine Klassifizierung - wie Haberäcker (1977) an praktischen Beispielen anschaulich nachgewiesen hat - mit den drei bis vier größten Hauptkomponenten aus. (Bei einer Hauptkomponententransformation mit vielen Kanälen geben die höheren Komponenten nur mehr das Rauschen des ursprünglichen Bildes wieder.)



Kanal 1



Kanal 2



Kanal 3



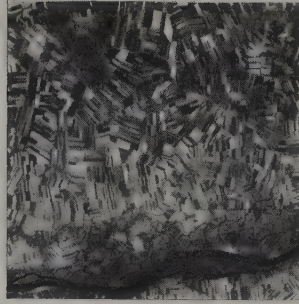
Kanal 4

*Bild 6.8-9a: Die ersten vier Kanäle einer TM-Aufnahme (Tab. 4.2-14), wobei vor der Ausgabe in jedem Kanal die Verteilung der Grauwerte linear gestreckt wurde (6.6.1). (Gebiet: Donauauen und Marchfeld, östlich von Wien)*

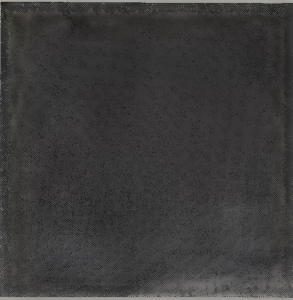




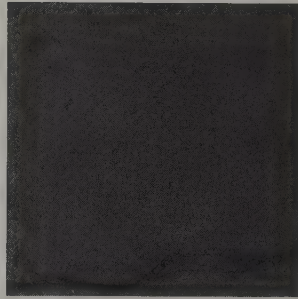
$$\sigma_1^G = \pm 55$$



$$\hat{\sigma}_2^G = \pm 34$$



$$\hat{\sigma}_3^G = \pm 6.9$$



$$\hat{\sigma}_4^G = \pm 5.8$$

Bild 6.8-9b: Schwarzweißbilder der vier Kanäle nach der Hauptkomponententransformation und Angabe der Variation der Grauwerte in Form der Standardabweichung

Zum Schluß sollen die Vor- und Nachteile der Hauptkomponententransformation vor einer Klassifizierung gegenübergestellt werden. Der Vorteil ist die Beschränkung auf die substantiellen Kanäle; die Nachteile sind der nicht zu unterschätzende Rechenaufwand der Hauptkomponententransformation und der Umstand, daß nicht mehr die originären, im elektromagnetischen Spektrum festgelegten Kanäle benutzt werden. Will man eine Klassifizierung mit den ursprünglichen Grauwerten  $g_k$  und nicht mit den gedrehten Grauwerten  $\hat{g}_k$  durchführen, so reduziert man die Kanäle mittels der Varianz-Kovarianzmatrix  $\underline{C}^G$ . Diese Auswahl der wichtigsten Kanäle wird mit Hilfe der Korrela-



tionskoeffizienten (6.8-11) getroffen.<sup>1</sup>

Die Auswahl der wichtigsten drei Kanäle eines Multispektralbildes ist auch für farbige Präsentationen eines Bildes mit den drei Grundfarben von Wichtigkeit. Auf diese Weise erhält man ein Bild mit der größtmöglichen Farbdifferenzierung. Die erhaltenen Farben haben allerdings mit einem natürlichen Farbbild oder einem Farbinfrarotbild nichts zu tun. Man kann anhand eines derart abgeleiteten Bildes aber bereits visuell gut beurteilen, welche Merkmale in den Daten (durch eine multispektrale Klassifizierung) unterschieden werden können.

Aufgabe 6.8-9: Man entscheide anhand der Varianz-Kovarianzmatrix (6.8-31) welche zwei Kanäle für eine multispektrale Klassifizierung die besten Ergebnisse erwarten lassen. Zusatzaufgabe: Welche Kanäle wären für eine multispektrale Klassifizierung mit drei Kanälen zu verwenden?

#### 6.8.5 Klassifizierung mittels maximaler Mutmaßlichkeit (maximum likelihood)

Aufgrund der Überlegungen des letzten Abschnittes liegt die Vorgangsweise bei einer Klassifizierung mittels maximaler Mutmaßlichkeit bzw. größter Wahrscheinlichkeit auf der Hand. Das Verfahren beginnt damit, daß für jedes Trainingsgebiet der jeweiligen Objektklasse die Wahrscheinlichkeitsdichte  $f(g)$  in der Form einer K-dimensionalen Normalverteilung (6.8-12) berechnet wird.<sup>2</sup> Für das zu klassifizierende Bildelement mit dem Grauwertvektor  $g = (g_1 \dots g_k \dots g_K)^T$  werden dann die Wahrscheinlichkeitsdichten  $f(g)^i$  für alle mit Trainingsgebieten erfaßten Objektklassen  $O_i$  ( $i=1(1)I$ ) ermittelt. Das zu klassifizierende Bildelement wird schließlich jener Objektklasse mit der größten Wahrscheinlichkeitsdichte  $f(g)_{\max}^i$  zugeordnet (maximum likelihood).

<sup>1</sup> In der Literatur findet man auch ganz andere Kriterien für die Auswahl der relevanten (ursprünglichen) Kanäle für eine Klassifizierung. Ma und Olson (1989) verwenden z.B. die Überlappung der Punktwolken der verschiedenen Objektklassen als Kriterium: Es werden jene Kanäle ausgewählt, bei denen sich die Punktwolken der Trainingsgebiete am wenigsten überlappen.

<sup>2</sup> Bei besonders kleinen Trainingsgebieten müßte man anstelle der Normalverteilung allerdings eine t-Verteilung heranziehen, die die Unsicherheit der empirisch bestimmten Mittelwerte und Varianzen bzw. Kovarianzen berücksichtigt. Mit dem in Statistiklehrbüchern beschriebenen  $\chi^2$ -Anpassungstest kann weiters überprüft werden, ob eine Normal- oder t-Verteilung vorliegt. Falls diese (Null-)Hypothese abgelehnt werden muß, muß die Punktwolke mit ganz anderen Verteilungen angenähert werden - z.B. mit einem Konglomerat von Kreisflächen im zweidimensionalen Merkmalsraum (Schulz, 1988).

classification).<sup>1</sup>

Die Trennungslinien bzw. Trennungsflächen, also die Diskriminatoren, sind bei dieser Klassifizierungsmethode die Verschneidungslinien bzw. Verschneidungsflächen der K-dimensionalen Normalverteilungen  $f(\mathbf{g})^i$  (6.8-12).

Im eindimensionalen Fall sind die Verhältnisse im Bild 6.8-10 skizziert. Dabei wurden die Grauwerte  $g_1$  des Bildes 6.8-4a benutzt. Mit den Bildelementen des Trainingsgebietes der Objektklasse  $O^1$  ergibt sich  $\bar{g}_1^1 = 101$  und  $\sigma_1^1 = \pm 16.6$ , mit den Bildelementen des Trainingsgebietes  $O^4$   $\bar{g}_1^4 = 147$  und  $\sigma_1^4 = \pm 9.3$ .

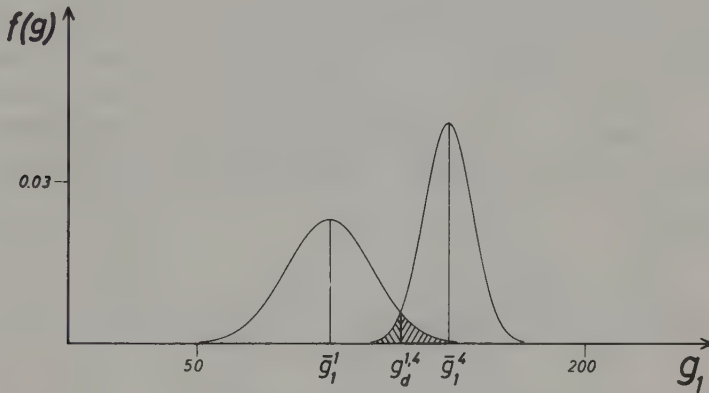


Bild 6.8-10: Wahrscheinlichkeitsdichten von zwei Objektklassen  $O^1$   $O^4$  mit dem Diskriminator  $g_1^{1,4}$  und Schraffur der falsch klassifizierten Anteile

<sup>1</sup> Um Rechenzeiten zu sparen, müssen allerdings nicht die Wahrscheinlichkeitsdichten  $f(\mathbf{g})^i$  für alle Objektklassen mittels der Gleichung (6.8-12) vollständig ausgewertet werden. Es genügt vielmehr, mit dem Diskriminator

$$d^i = -\ln|\underline{C}^i| - (\mathbf{g} - \bar{\mathbf{g}}^i)^T (\underline{C}^i)^{-1} (\mathbf{g} - \bar{\mathbf{g}}^i)$$

zu arbeiten, der durch Logarithmieren von (6.8-12) und Weglassen von Konstanten entsteht. Vernachlässigt man den ersten Term, der für alle Bildpunkte einer Objektklasse gleich ist, und benutzt man nur den Diskriminator

$$d^i = (\mathbf{g} - \bar{\mathbf{g}}^i)^T (\underline{C}^i)^{-1} (\mathbf{g} - \bar{\mathbf{g}}^i),$$

so spricht man von der Mahalanobis-Klassifizierung. Sie hat eine große Ähnlichkeit mit der Klassifizierung mittels kürzester Entfernung (6.8.2). Zwischen den beiden Vektoren ist lediglich die inverse Varianz-Kovarianzmatrix  $\underline{C}^{-1}$  eingeschoben.

Im Bild 6.8-10 sieht man, daß der Diskriminator  $g_d^{1,4}$  zwischen den Objektklassen  $O^1$  und  $O^4$  bei  $g_d^{1,4} = 128.3$  liegt. Alle Bildelemente mit einem Grauwert kleiner als 128.3 werden der Objektklasse  $O^1$  und alle Bildelemente mit einem Grauwert größer als 128.3 der Objektklasse  $O^4$  zugewiesen. Die schraffierten Teile im Bild 6.8-10 sind ein Maß für die falsch klassifizierten Bildelemente. Die Fehlklassifizierungen sind umso kleiner

- je weiter die Mittelpunkte  $\bar{g}_k^i$  auseinander liegen (je stärker sich die Grauwerte von Objektklasse zu Objektklasse unterscheiden) und
- je kleiner die Standardabweichungen  $\sigma_k^i$  sind (je einheitlicher die Grauwerte innerhalb der einzelnen Objektklassen sind).

Für die beiden Kanäle  $g_1$  und  $g_2$  (Bild 6.8-4a,b) sind im Bild 6.8-11 für die vier Trainingsgebiete die Ellipsen gleicher Wahrscheinlichkeit ( $h = 2.5, 3.0$ ) eingezeichnet. Die Zurückweisungsklasse legt man mit einer entsprechenden Wahl des  $h$ -Faktors fest. Im Bild 6.8-11 liegt die Zurückweisungsklasse außerhalb der 3-fachen Standardellipse. Diese Standardellipsen

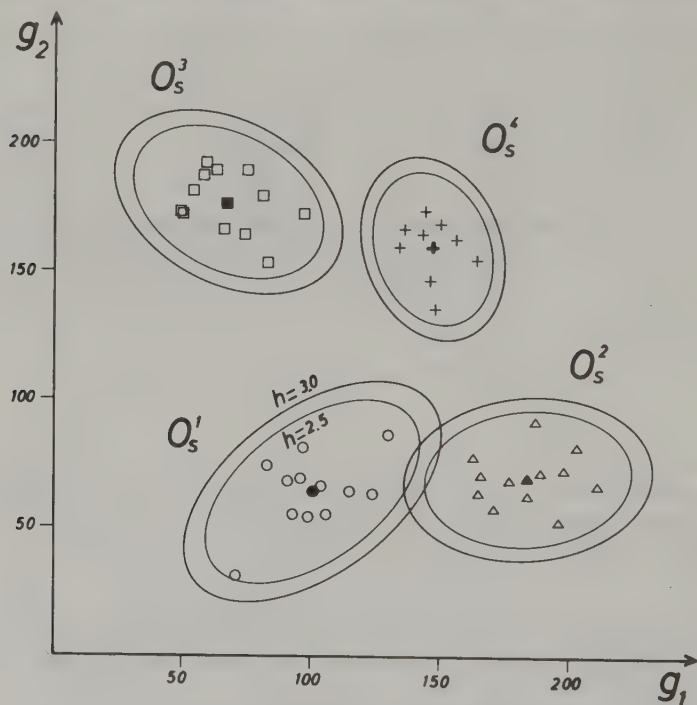


Bild 6.8-11: Ellipsen gleicher Wahrscheinlichkeitsdichte ( $h = 2.5, h = 3.0$ )

sind mit den Rechtecken der Klassifizierungsmethode mittels Quader (Bild 6.8-5a) vergleichbar. Man sieht, daß sich die Ellipsen (Bild 6.8-11) wesentlich besser an die Punktwolken annähern als die Rechtecke (Bild 6.8-5a).

Eine Verfeinerung der Klassifizierung mittels Wahrscheinlichkeitsdichte besteht darin, anstelle der Wahrscheinlichkeitsdichten  $f(g)^i$  (6.8-12) jene Wahrscheinlichkeitsdichten  $f'(g)^i$  (6.8-30) zu benutzen, die die relativen Häufigkeiten  $p^i$  zwischen den verschiedenen Objektklassen berücksichtigen. Zur Berechnung der relativen Häufigkeiten  $p^i$  mittels der Gleichung (6.8-29) braucht man aber die Anzahl  $N^i$  der Bildelemente in der jeweiligen Objektklasse  $O^i$ . Für eine solche Klassifizierung benötigt man also bereits das Ergebnis der Klassifizierung, allerdings nur grob geschätzt. Die relativen Häufigkeiten  $p^i$  kann man z.B. aus einer vorausgehenden Klassifizierung mittels Quader (6.8.3) ermitteln. Falls eine Klassifizierung zur Feststellung von Veränderungen benutzt wird, kann oftmals das Klassifizierungsergebnis mit dem älteren Datum für die relativen Häufigkeiten  $p^i$  herangezogen werden.

Zur Demonstration der Wirkungsweise einer Klassifizierung mit den Wahrscheinlichkeitsdichten  $f'(g)^i$  (6.8-30) benutzen wir das im Bild 6.8-4 eingeführte Beispiel. Das dort benutzte (einfache) Klassifizierungsverfahren hat für die Objektklasse  $O^1$  95 Bildelemente und für die Objektklasse  $O^4$  65 Bildelemente ergeben. Da das Bild aus insgesamt  $19 \times 19 = 361$  Bildelementen besteht, betragen die relativen Häufigkeiten (6.8-29)  $p^1 = 95/361 = 0.26$  und  $p^4 = 65/361 = 0.18$ . Damit können die ursprünglichen Normalverteilungen "gewichtet" werden (6.8-30). Für den eindimensionalen Fall gehen die Normalverteilungen des Bildes 6.8-10 in die Normalverteilungen des Bildes 6.8-12 über. Anstelle des Diskriminators  $g_d^{1,4} = 128.3$  tritt jetzt der Diskriminator  $g_d^{1,4} = 129.5$ .

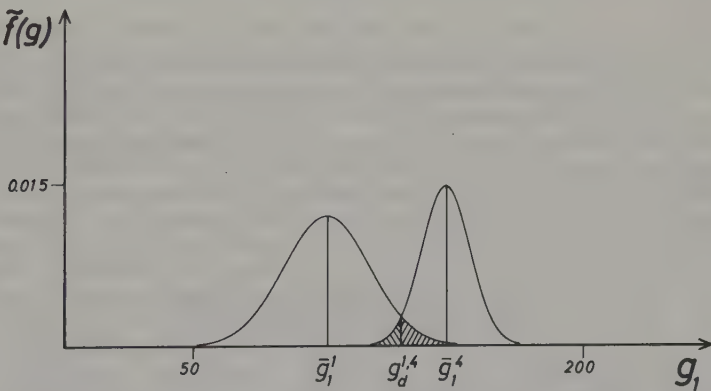


Bild 6.8-12: Gewichtete Wahrscheinlichkeitsdichten der beiden Objektklassen  $O^1$  und  $O^4$  mit dem Diskriminator  $g_d^{1,4}$  (Vergleich mit Bild 6.8-10)

Eine weitere Verfeinerung der Klassifizierung mittels Wahrscheinlichkeitsdichte besteht darin, anstelle der Wahrscheinlichkeitsdichte  $f(g)$  bzw.  $f'(g)$  die integrale Verteilungsfunktion  $P(h)$ , die für den eindimensionalen

Fall mittels der Gleichung (6.8-15) formuliert wurde, zu verwenden. Ein auf der integralen Verteilungsfunktion beruhender Diskriminator erlaubt, die Rate der Fehlklassifizierungen für die verschiedenen Objektklassen möglichst gleich zu machen, sodaß für Flächenbilanzen das wahrscheinlichste Ergebnis erzielt wird. Dagegen liefert eine Klassifizierung mittels der Wahrscheinlichkeitsdichte den wahrscheinlichsten Verlauf der Trennungslinien zwischen den verschiedenen Objektklassen. Nähere Details entnehme man der Publikation (Kraus, 1979).

#### 6.8.6 Modifizierte und/oder zusätzliche Kanäle für die Klassifizierung

Die Grauwerte  $g = (g_1 \dots g_k \dots g_K)$  eines Multispektralbildes sind bekanntlich ein Maß für die an den Sensoren ankommenden spektralen Bestrahlungsstärken  $E_\lambda$  (3.1-15) und (3.2-22). Die spektralen Bestrahlungsstärken und damit auch die Grauwerte eines Bildelementes in den verschiedenen Kanälen werden durch einige Einflußfaktoren proportional verändert (z.B.  $\cos \theta_s$  oder  $\cos^4 \alpha$  in (3.1-15)). Solche Proportionalitätsfaktoren bewirken, daß die Bildelemente der gleichen Objektklasse entlang von Ursprungsgeraden verschoben werden. (Bild 6.8-13 zeigt die Verhältnisse für zwei Kanäle). Den (störenden) Einfluß solcher Proportionalitätsfaktoren kann man dadurch eliminieren, daß man anstelle der ursprünglichen Grauwerte  $g = (g_1 \dots g_k \dots g_K)$  neue Grauwerte  $g'$  für die multispektrale Klassifizierung benutzt, die wie folgt ermittelt werden:

$$\begin{aligned} g'_1 &= g_1 / \sqrt{g_1^2 + \dots + g_k^2 + \dots + g_K^2} \\ g'_k &= g_k / \sqrt{g_1^2 + \dots + g_k^2 + \dots + g_K^2} \\ g'_K &= g_K / \sqrt{g_1^2 + \dots + g_k^2 + \dots + g_K^2} \end{aligned} \quad (6.8-33)$$

In der Literatur (z.B. Quiel, 1976) spricht man in diesem Zusammenhang von einer multispektralen Klassifizierung mittels Richtungscosinus.

Anstelle der modifizierten Grauwerte (6.8-33) kann man auch Grauwerte benutzen, die nach den Beziehungen (6.5-28) oder (6.5-30) gebildet werden. Die auf diese Weise modifizierten Grauwerte sind unabhängig von der Blickrichtung und der Geländeform (6.5.3). Der Einfluß der Geländeform auf die Grauwerte kann auch noch nach einem anderen Verfahren eliminiert werden: Man berechnet sich mit Hilfe des digitalen Geländemodelles und des Sonnenstandes im Augenblick des Überfluges die (synthetischen) Strahlungswerte für die einzelnen Bildelemente (Bild 5.1-24 zeigt ein Beispiel). Mit diesen Bildelementen kann das reale Fernerkundungsbild "normalisiert" werden, das heißt von den geländeformabhängigen Strahlungseffekten befreit werden. Eine solche Normalisierung von TM-Aufnahmen wurde vor kurzem publiziert (Civco, 1989). Die Standardabweichung der Grauwerte innerhalb der einzelnen Objektklassen konnte durch diese Normalisierung um etwa 60% verringert werden. Dadurch ergibt sich auch eine beachtliche Verbesserung der Ergebnisse der multispektralen Klassifizierung. Die im Abschnitt 5.6.2 angeschnittenen Probleme der objektbedingten Richtungsabhängigkeit des gerichteten Reflexionsgrades sind aber auch bei diesem Verfahren zu beachten.

Falls Vegetationsarten und/oder Vegetationsschäden klassifiziert werden sollen, ist - wie das Bild 3.1-22 zeigt - die aussagekräftigste Information die Differenz der nahen infraroten Objektstrahlung (nIR) und der roten Objektstrahlung (R). In der Literatur (z.B. Gallo, Eidenshink, 1988) wird



diese Differenz als Vegetationsindex (VI) bezeichnet; er wird wie folgt definiert:

$$VI = \frac{nIR - R}{nIR + R} \quad (6.8-34)$$

Mit den Kanalnummern des TM (Tab. 4.2-14) lautet der Vegetationsindex  $VI = (\text{Kanal 4} - \text{Kanal 3}) / (\text{Kanal 4} + \text{Kanal 3})$ . Anstelle der Grauwerte der Kanäle 4 und 3 werden also nur die Grauwerte des Vegetationsindex in der Klassifizierung benutzt. Auf diese Weise kann man die Datenmenge beachtlich reduzieren und trotzdem die wichtigste Information erhalten.

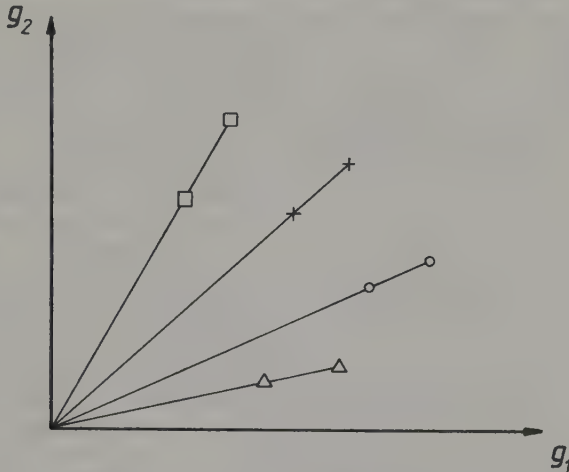


Bild 6.8-13: Jeweils zwei Bildelemente in vier Objektklassen, die sich um Proportionalitätsfaktoren unterscheiden

Die Textur des Bildinhaltes in der Umgebung des zu klassifizierenden Bildelementes kann mit Hilfe zusätzlicher Kanäle in die multispektrale Klassifizierung einbezogen werden. Die Strukturierung eines Bildes mit Hilfe eines Quadtree (6.11.2.4) liefert z.B. eine solche Texturinformation: Jene Bildelemente, die der Wurzel sehr nahe sind, gehören zu Bereichen mit wenig Textur (z.B. landwirtschaftlich genutzte Flächen in großmaßstäbigen Bildern); jene Bildelemente, die von der Wurzel weit entfernt sind, gehören zu Bereichen mit viel Textur (Bäume in großen Bildmaßstäben, besiedelte Gebiete usw.). Ein zusätzlicher "Texturkanal" wird in der Weise aufgebaut, daß die "Grauwerte" die Entfernungen der jeweiligen Bildelemente von der Wurzel bzw. die Anzahl der Niveaus im Sinne des Abschnittes 6.11.2.4 wiedergeben. (Andere Texturparameter findet man bei Pfeiffer, 1985.)

Zusätzliche Kanäle für automatische Klassifizierungen bieten multitemporale Bilder. Sie enthalten die Objekte zu verschiedenen Zeitpunkten und bieten somit wichtige Informationen für den Entscheidungsprozeß. Aus der multispektralen Klassifizierung wird die multitemporale Klassifizierung (change detection). Eine wichtige Aufgabe der multispektralen Klassifizierung ist die Überwachung (monitoring) von Veränderungen der Objekte in Abhängigkeit der Zeit, z.B. die Veränderung der Vegetationsschäden von Jahr zu Jahr. Zur Klärung dieser Aufgabe gibt es neben der multitemporalen Klassifizierung (direct multirate classification) auch mehrere andere Möglichkeiten. Singh (1989) hat diese Methoden übersichtlich zusammengestellt.

Zusätzliche Kanäle kann man auch aus dem digitalen Geländemodell (5.1.4.4) übernehmen. Zu diesem Zweck führt man z.B. die Geländehöhen in "Grauwerte" über (5.1.4.4a) und benutzt sie als einen zusätzlichen Kanal in einer multispektralen Klassifizierung. Diese Höheninformation bringt mit Sicherheit große Fortschritte bei einer Landnutzungskartierung im Hochgebirge, wo verschiedene Vegetationsarten stark höhenkorreliert sind. So wie man die Geländehöhen in die Klassifizierung einbeziehen kann, kann natürlich auch aus der Geländeneigung ein zusätzlicher Kanal abgeleitet werden.

#### 6.8.7 Hybride Klassifizierungsansätze

Die bisher beschriebenen Klassifizierungsmethoden zeichnen sich dadurch aus, daß mit Hilfe der Trainingsgebiete für die individuellen Bildelemente unabhängige Entscheidungen getroffen werden. Dabei werden ihre Nachbarschaftsbeziehung in der XY-Ebene nicht berücksichtigt. Benachbarte Bildelemente gehören aber mit einer größeren Wahrscheinlichkeit zur gleichen Objektklasse als räumlich weit auseinanderliegende Bildelemente. Ein Ansatz, der ausschließlich auf die Nachbarschaftsbeziehungen aufbaut, ist die sogenannte Bildsegmentierung, die wir im Abschnitt 6.9.1 kennenlernen werden.

Bei der Ermittlung der Veränderung der Landschaft mittels multitemporaler Fernerkundungsdatensätze (change detection) kommt noch eine andere Abhängigkeit hinzu: Die Bildelemente an gleichen XY-Positionen, aber unterschiedlichen Zeitpunkten, gehören mit einer wesentlich größeren Wahrscheinlichkeit zur gleichen Objektklasse als Bildelemente an unterschiedlichen XY-Positionen. Jener Datensatz, der bei einem solchen "Monitoring" den Altbestand repräsentiert, ist in vielen Fällen der in topographischen Informationssystemen gespeicherte Kartenbestand. Anhand des (alten) Kartenbestandes kann sozusagen ein Expertensystem für die Fernerkundung trainiert werden, ein Gedanke, der in den Abschnitten 6.9.4 und 6.9.5 nochmals aufgegriffen wird. Eine von vielen Literaturstellen für diese hybriden Klassifizierungsverfahren: Corr et al., 1989.

#### 6.8.8 Nachbehandlung des Klassifizierungsergebnisses

Nach einer multispektralen Klassifizierung - wie sie in den Abschnitten 6.8.2, 6.8.3 und 6.8.5 besprochen wurde - kommt es vor, daß innerhalb der Flächen der verschiedenen Objektklassen einzelne, falsch klassifizierte Bildelemente eingestreut sind. Diese Ausreißer im Klassifizierungsergebnis kann man mit Modalfilterung (6.7.1) auf einfache Weise beheben.

#### 6.8.9 Anwendungs- und EDV-orientierte Hinweise

Die Klassifizierung mittels maximaler Mutmaßlichkeit (6.8.5) liefert im allgemeinen bessere Ergebnisse als die Methoden mittels kürzester Entfernung (6.8.2) oder mittels Quader (6.8.3); die Klassifizierung mittels maximaler Mutmaßlichkeit ist aber rechnerisch am aufwendigsten. Das Ergebnis der Klassifizierung mittels maximaler Mutmaßlichkeit kann man mit wesentlich geringerem Aufwand auch erreichen, wenn man die Quadermethode (6.8.3) für die Vorentscheidung einsetzt und man mit "maximaler Mutmaßlichkeit" fortsetzt. Konkret läuft das kombinierte Verfahren so ab, daß das jeweilige Bildelement zunächst mit der Quadermethode klassifiziert wird, wobei man die Quader mit dem h-Faktor genauso dimensioniert wie die Ellipsen der Wahrscheinlichkeitsdichte. Fällt das zu klassifizierende Bildelement nur in einen Quader, ist mit der Wahrscheinlichkeitsdichte noch zu entscheiden, ob es zu dieser Objektklasse oder zur Zurückweisungsklasse gehört. Fällt das zu klassifizierende Bildelement in mehrere (überlappende) Quader, ist mit der Wahrscheinlichkeitsdichte zu entscheiden, zu welcher Objektklasse der

überlappenden Quader das Bildelement gehört oder ob es in die Zurückweisklasse einzuordnen ist.

Wenn sehr große Datenmengen zu klassifizieren sind, kann der Rechenaufwand dadurch reduziert werden, daß man die Klassifizierung mittels einer Look-up-Tabelle (6.6.1) löst. Die Look-up-Tabelle hat bei 256 Grauwertstufen  $256^K$  Elemente. Für jede mögliche Grauwertkombination aus den K Kanälen berechnet man die Objektzugehörigkeit und belegt die Look-up-Tabelle mit dieser Objektklasse. Mit den Grauwerten der tatsächlich zu klassifizierenden Bildelemente muß man dann nur in die Look-up-Tabelle eingehen und findet dort unmittelbar die gesuchte Objektklasse.

Die Qualität des Klassifizierungsergebnisses steht und fällt mit der richtigen Wahl der Trainingsgebiete. Sie müssen repräsentativ für die jeweilige Objektklasse sein. Ist eine Objektklasse im digitalen Bild sehr unterschiedlich ausgeprägt, sind für ein und die gleiche Objektklasse zwei und eventuell auch mehrere Trainingsgebiete einzuführen. Z.B. kann Grünland frisch gemäht, vital bestockt oder kurz vor dem Schnitt sein. In diesem Fall benötigt man drei Objektklassen samt Trainingsgebiete für Grünland. Nach der multispektralen Klassifizierung werden die drei unterschiedlichen "Grünland"-Klassen zu einer Objektklasse "Grünland" zusammengefaßt.

Die automatische Klassifizierung digitaler Bilder hat eine große Bedeutung bei der Auswertung von Satellitenbildern erlangt. Dabei geht es meistens um die Feststellung der Landnutzung. Die kurzen Wiederholungszeiten der Satellitenaufnahmen bieten in Verbindung mit einer automatischen Klassifizierung die Möglichkeit, die Landnutzung in ihrer Veränderung im Laufe eines Jahres verhältnismäßig genau zu überwachen. Die automatische Klassifizierung großmaßstäbiger Luftbilder ist dagegen in der Praxis noch wenig verbreitet. In den großmaßstäbigen Bildern sind die Objektmerkmale weniger in den Grauwerten der verschiedenen Kanäle als vielmehr in der geometrischen Form verpackt. Der menschliche Beobachter kann im Stereomodell sehr leicht Gebäude von Bäumen usw. trennen. Diese geometrischen Formparameter lassen sich aber nicht leicht in Algorithmen fassen. Im folgenden Kapitel 6.9 werden zu dieser Problematik einige Überlegungen angestellt.

Zusätzliche Literatur zur multispektralen Klassifizierung: Ekenobi, 1986, Gierloff-Emden, 1989, Rosenfield, 1986.

### 6.9 Bemerkungen zur Mustererkennung

Unter Mustererkennung (pattern recognition) versteht man Verfahren zur automatischen Analyse von Bildern. Ein automatisches Interpretationsverfahren, welches den spektralen Inhalt eines Bildes verwendet, wurde im vorhergehenden Abschnitt 6.8 über die multispektrale Klassifizierung besprochen. Es wurde aber dort auch bereits angedeutet, daß die reine multispektrale Analyse sehr oft nicht zu den gewünschten Ergebnissen führt. Dies ist besonders dann der Fall, wenn auch die Textur ein entscheidendes Kriterium für das Erkennen eines Bilddetails darstellt. Diese Schwierigkeiten ergeben sich vor allem dann, wenn großmaßstäbige Fernerkundungsbilder interpretiert werden sollen, in denen die für die agrarische Kultur charakteristische Bestellungsweise oder die Kleinstruktur des Bewuchses zu erkennen ist (z.B. Zeilenform von Weingärten, Obstplantagen und manchen Feldfruchtkulturen; Kronenform verschiedener Baumarten). Hier liefern nicht die Spektralwerte der einzelnen Bildelemente die entscheidende Information, sondern die Regelmäßigkeiten in der Anordnung der Bildelemente zueinander ist für die Klassenzuordnung entscheidend. Texturparameter, abgeleitet aus statistischen Größen, können zwar noch in die multispektrale Klassifizierung eingeführt werden (6.8.6), doch dieses Verfahren hat seine Grenzen.

Die Mustererkennung gehört zu den komplexen Bildverarbeitungsmethoden. Es geht darum, ein im voraus definiertes Muster (entweder ein Musterbild oder eine semantische Definition) in einem Bild zu erkennen, das heißt zu finden und zu interpretieren. Die Mustererkennung transformiert demnach einen Bildinhalt - ev. unter Zuhilfenahme von Zusatzinformation -, in einen semantisch festgelegten Bedeutungsinhalt.

Der Anwendungsbereich ist sehr vielseitig (z.B. Robotik, Belegleser; allgemein: computer vision) und auch die Methoden, die zur Anwendung gelangen, sind sehr vielfältig und oft speziell an ein bestimmtes Anwenderproblem angepaßt. Auf Grund der Kompliziertheit der Verfahren und der Forderung nach schneller Bearbeitung - wenn möglich in Echtzeit (z.B. bei Belegleser oder Robotersteuerung) - erfolgt die Realisierung meist nicht rein softwaremäßig. Es gibt auf bestimmte Probleme zugeschnittene Mustererkennungsprozessoren.

Der gesamte Prozeß der Mustererkennung besteht in einer Folge von einzelnen Bildverarbeitungsprozessen, welche grob in drei Hauptgruppen eingeteilt werden können:



1) Bildaufbereitung (niederes Niveau)

Ausgehend von den Originalbilddaten stehen am Beginn im allgemeinen die Verfahren der Bildverbesserung und Bildaufbereitung, wie z.B. Kontrastoperationen (6.6), Filterungen (um bestimmte Strukturen zu verstärken, die für gewisse Muster charakteristisch sind, 6.7), Umformatieren auf günstigere Datenorganisation u.ä. Die Datenmengen, welche in diesem Schritt verarbeitet werden müssen, sind zwar meist sehr groß, die verwendeten Algorithmen jedoch relativ einfach und können verhältnismäßig leicht hardwaremäßig gelöst werden, da keine große Flexibilität erforderlich ist.

2) Bildverarbeitung (mittleres Niveau)

In diesem Schritt muß ebenfalls eine große Datenmenge bewältigt werden. Es kommen aber bereits Algorithmen zur Anwendung, die flexibel gehalten werden müssen. Das heißt, daß man in vielen Fällen Softwarelösungen anstrebt, die allerdings den Nachteil einer geringeren Verarbeitungsgeschwindigkeit haben. Bei zeitkritischen Anwendungen ist daher auf schnelle Algorithmen besonders zu achten. Sehr oft geht es darum, aus den Bilddaten Bereiche einzugrenzen, welche für die Detailinformation in Frage kommen werden (z.B. Bildsegmentation, 6.9.1) oder Datenstrukturen einzuführen, die in weiterer Folge eine vereinfachte Bearbeitung erlauben (z.B. Bildpyramiden, 6.9.3). Die Hauptaufgabe dieses Schrittes ist die Reduktion der Datenmengen durch Ausscheiden nicht relevanter Bildinformation.

3) Bildinterpretation (hohes Niveau)

Der letzte Schritt umfaßt die Lösung der gestellten Mustererkennungsaufgabe. Er ist im allgemeinen sehr komplex und muß auch sehr flexibel gestaltet werden. In manchen Fällen erhält man eine optimale Lösung des Problems nur dann, wenn das EDV-Programm imstande ist, selbständig den Entscheidungsweg auf Grund von Entscheidungen, die bereits früher im Zuge der Auswertung getroffen wurden, zu verändern (Expertensystem, 6.9.4). Allerdings werden die umfangreichen Operationen nur mehr auf relativ wenige Eingangsdaten angewandt, da zu diesem Zeitpunkt bereits eine gewisse Datenselektion stattgefunden hat.

In letzter Zeit wird versucht, immer mehr sogenannte neuronale Netzwerke (6.9.5) einzusetzen, deren Anwendung nicht so sehr auf ein spezielles Problem beschränkt ist. Ihre flexible Anwendbarkeit erlaubt auch ohne größeren Mehraufwand, Aufgaben des niederen oder mittleren Bildverarbeitungsniveaus mit zu übernehmen. Allerdings steht man hier erst am Anfang der Entwicklung. An eine verbreitete wirtschaftliche Anwendung kann erst gedacht werden, wenn eigene praxisgerechte Prozessoren und neue Programmieretechniken für diese Aufgabe zur Verfügung stehen.

Im folgenden soll und kann keine umfangreiche Darstellung der Mustererkennung gegeben werden. Zu unterschiedlich sind die Lösungsansätze. Es werden daher nur einzelne allgemein verwendete Verarbeitungsschritte kurz vorgestellt.



### 6.9.1 Bildsegmentierung

Unter Bildsegmentierung versteht man Verfahren, welche ein Bild in zusammengehörende, in Bezug auf gewisse Charakteristika homogene Bereiche unterteilen. Die multispektrale Klassifizierung (6.8) und die Äquidensitendarstellung (6.6.2), wo Bereiche gleicher spektraler Merkmale festgestellt werden, sind Segmentierungsverfahren. Es sind pixelbezogene Verfahren, die die örtliche Nachbarschaft der Bildelemente im Segmentierungsprozeß nicht berücksichtigen. Die folgenden Segmentierungsverfahren berücksichtigen die örtliche Nachbarschaft. Dabei bestimmt der Anwendungsbereich die Vorgangsweise.

Die Segmentfestlegung kann auf zwei Arten erfolgen:

- durch die zusammengehörende Fläche (d.h. durch die Menge aller Pixel), die ein Bildsegment bildet, und
- durch die Begrenzungslinien, die verschiedenartige Flächen voneinander trennen.

Beide Segmentfestlegungen sind gleichwertig, da die Menge der zusammengehörenden Pixel eines Bildsegmentes durch eine geschlossene Umfangslinie begrenzt wird. Eine sinnvolle Vorgangsweise, um zusammengehörende Flächen zu finden, kann daher sein, Grenzlinien (etwa markante Kanten) zu bestimmen und erst anschließend die von den Linien umschlossenen Flächen auf Homogenität zu untersuchen. Die Kantenextraktion (edge detection) ist daher eine zentrale Aufgabe vieler Verfahren der Mustererkennung. Sie kann am einfachsten durch Filterung mit dem Laplaceoperator (6.6.4) oder auch durch umfassendere Ansätze wie z.B. die weit verbreitete "Zero-Crossing"-Methode (Marr, Hildreth, 1980) erfolgen.

Bei Segmentierungsverfahren ist es sehr schwierig, die Kanten auszuwählen, die sinnvoll im Sinne der Segmentierung sind, das heißt die eine zusammengehörende Fläche umschließen. Das Ergebnis eines Kantenextraktionsverfahrens ist nämlich eine Folge von mehr oder weniger langen, nicht zusammenhängenden Linienstücken. Da es in einem Bild im allgemeinen sehr viele lokale Kanten bzw. Störungen gibt, ist nicht jedes gefundene Linienstück ein Element einer Segmentbegrenzung. Es muß daher ein Kriterium gefunden werden, welches die sinnvollen von den nicht sinnvollen Kanten unterscheidet und die Linienelemente zu einer geschlossenen Umfangslinien ergänzt. Diese Aufgabe löst man am sichersten dadurch, daß man das (binäre) Kantenbild zunächst von der Rasterstruktur in eine Vektorstruktur umwandelt (Vek-

tor/Rasterkonversion) und anschließend mit einem interaktiven graphischen System ein flächenbegrenzendes Liniennetz erzeugt (C 2.5.2).

Eine andere Methode zur Bildsegmentierung ist das Gebietswachstum (region growing). Vorausgesetzt wird dabei ein a priori-Wissen: Pro Bildsegment muß die Lage eines Pixels oder besser einer Pixelgruppe bekannt sein. Ausgehend von diesen vorgegebenen Bildelementen werden nun für die weiteren benachbarten Bildelemente Ähnlichkeitskriterien angewandt. Auf diese Weise wird das Startpixel nach und nach zu einem Gebiet vergrößert. Wie die Ähnlichkeit definiert wird, ist vom Anwendungsfall abhängig und kann sich auf einfache Grauwertdifferenzen in einem oder in mehreren Spektralbereichen oder auch auf Texturparameter beziehen. Ist als Startpunkt eine Pixelgruppe - ähnlich einem Trainingsgebiet bei der multispektralen Klassifizierung - gegeben, so können eventuell daraus Ähnlichkeitskriterien automatisch abgeleitet werden. Ein Segment ist vollständig ausgebildet, wenn keine Bildelemente mehr angefügt werden können, die dem Ähnlichkeitskriterium genügen. Es ist jedoch darauf zu achten, daß ein Verfahren gewählt wird, welches unabhängig vom Startpunkt innerhalb eines Segmentes und unabhängig von der Reihenfolge der Abarbeitung der Segmente die gleichen Ergebnisse liefert.

Bisher wurde vorausgesetzt, daß von vornherein die Anzahl der Segmente, ihre ungefähre Lage und pro Segment mindestens ein Bildelement bekannt sind. Diese Voraussetzung kann auch automatisch geschaffen werden. Solche Verfahren werden "region clustering" genannt. Sie sind auch der Anfang für eine unüberwachte Klassifizierung. Es ging dort darum, im multispektralen Merkmalsraum Häufungstellen (cluster) und ihre Zentren herauszufinden. Dabei wurde aber nicht gefordert, daß die Bildelemente eines Clusters ein zusammenhängendes Gebiet bilden. Beim "region clustering" sind auch gebietsmäßige Zusammengehörigkeiten zu berücksichtigen, wodurch die Aufgabe sehr viel schwieriger wird. Hilfreich ist unter Umständen die vorherige Ableitung eines Kantenbildes, aus dem zunächst Segmentgrenzen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ermittelt werden können.

### 6.9.2 Hough-Transformation

Viele Mustererkennungsprozesse laufen darauf hinaus, charakteristische Linien oder Linienelemente in Bildern zu erkennen. Für eine solche Erkennung eignet sich in gewissen Fällen die Hough-Transformation. Dabei wird die häufigste Lage bestimmter Linienelemente gefunden. Die geometrische Form der Linienelemente (z.B. Geraden oder Kreise) muß allerdings bekannt sein und durch eine analytische Gleichung mit zunächst unbekannten Werten für die Parametern beschrieben werden.

Die Hough-Transformation ist eine Transformation vom x,y-Raum in den Parameterraum, der durch die Parameter der analytischen Gleichung bestimmt wird. Sie läßt sich vorteilhaft für jene Kurven verwenden, die mit einer kleinen Anzahl von Parametern beschrieben werden können. Der Rechen- und Speicheraufwand steigt exponentiell mit Zunahme der Anzahl der Parameter.

Das Prinzip dieser Transformation sei anhand eines geraden Linienelementes gezeigt. Die Geradengleichung im zweidimensionalen kartesischen x,y-Koordinatensystem lautet:

$$y = k x + d. \quad (6.9-1)$$

Eine Umformung dieser Gleichung ergibt:

$$d = -x k + y. \quad (6.9-2)$$

Nimmt man x und y als Konstante und die Parameter d und k als Variable an, so ergibt sich ebenfalls eine Geradengleichung. Diese Gerade ist im zweidimensionalen kartesischen k,d-Koordinatensystem, dem Parameterraum, festgelegt. Die Menge aller Geraden, die im x,y-Raum durch einen Punkt gelegt werden kann, ist im Parameterraum durch eine einzelne Gerade repräsentiert. Eine andere Eigenschaft der Hough-Transformation: Punkte, die im x,y-Raum auf ein und derselben Geraden liegen, werden im Parameterraum zu einem Punkt mit den k,d-Koordinaten.

Da k den  $\tan(\alpha)$  darstellt (wobei  $\alpha$  der Anstiegswinkel der Geraden im x,y-Raum ist), nähern sich im Parameterraum mit zunehmendem Anstieg die Werte für k und d unendlich. Für eine zur y-Achse parallele Gerade gilt im Parameterraum  $k = \infty$ . Es ist daher sinnvoll, für die Parameterdarstellung die Hesse'sche Normalform zugrunde zu legen:

$$x \cos(\alpha) + y \sin(\alpha) = p,$$

wobei p der Abstand der Geraden zum Koordinatenursprung ( $x = y = 0$ ) und  $\alpha$  der Winkel ist, den die Normale auf die Gerade mit der x-Achse einschließt. Im Parameterraum werden dann die Parameter  $\alpha$  (mit  $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ ) und p (mit  $p \geq 0$ ) verwendet. Für alle Geraden, die im x,y-Raum durch denselben Punkt gehen, ergibt sich im  $\alpha$ ,p-Raum eine Sinuskurve. Alle Punkte, die im x,y-Raum auf ein und derselben Geraden liegen, bilden sich im Parameterraum in einem Punkte mit den Koordinaten  $\alpha$  und p ab.

Anwendungsbeispiel: Eine Erkennung von Geradenstücken soll mit Hilfe der Hough-Transformation erfolgen. Zuerst hat eine Abschätzung des Wertebereiches der in Frage kommenden Parameter zu erfolgen. Dadurch wird die Größe eines digitalen Hilfsbildes, des Parameterbildes, festgelegt. In diesem Fall sollen die Parameter  $k$  und  $d$  verwendet werden. Die Spalten- und Zeilenpositionen entsprechen dann den Werten dieser Parameter. Die Elemente des Parameterbildes dienen in der Folge als Summationsregister; daher werden ihre Grauwerte mit 0 initialisiert. Vom zu untersuchenden Bild wird zuerst ein Gradientenbild abgeleitet (6.6.4), das anschließend Bildelement für Bildelement abgearbeitet wird. Unterschreitet der Wert des Gradienten eine vorgegebene Schranke, dann wird dieses Bildelement ignoriert (das heißt keine ausgeprägte Linie vorhanden). Im anderen Falle erfolgt eine Eintragung in das Parameterbild, wobei  $y$  auf der  $d$ -Achse "abgetragen" und von dort weg eine Gerade mit der Steigung  $(-x)$  gegenüber der  $k$ -Achse "gezeichnet" wird. Entlang dieser Geraden werden alle Grauwerte im Parameterbild um 1 zu erhöht. Damit hat man alle möglichen Geraden, die im  $x,y$ -Raum durch diesen Bildpunkt gehen können, im Parameterbild eingetragen. Ist das gesamte Bild abgearbeitet, wird das Parameterbild auf die größten Grauwerte hin untersucht. Ihre Pixelposition gibt dann die Parameter  $k$  und  $d$  jener Geraden an, die im Gradientenbild deutlich ausgeprägt sind. Will man stärker ausgeprägte Gerade mehr berücksichtigen, so kann man für die Summationen im Parameterbild nicht 1 sondern den Wert des Gradienten verwenden.

Zahlenbeispiel: In einem binären Bild sind drei Gerade gegeben. Jede dieser Geraden weist in ihrem Verlauf Lücken auf (Bild 6.9-1). Mit Hilfe der Hough-Transformation soll die Lage dieser Geraden gefunden werden. Zunächst wird ein Parameterbild definiert, dessen Dimensionierung prinzipiell beliebig sein kann, die aber auf den zu erwartenden Wertebereich von  $k$  und  $d$  abgestimmt werden soll. In diesem Beispiel wurde das Parameterbild (Bild 6.9-2) mit einer Größe von  $40 \times 40$  Pixel festgelegt. Die Zeilenindizes laufen in  $k$ -Richtung und die Spaltenindizes in  $d$ -Richtung. Außerdem wurde noch folgenden Zuordnung getroffen:

Zeilen 1 bis 40 entsprechen  $k = -1.5$  bis  $+1.5$   
 Spalten 1 bis 40 entsprechen  $d = 5.0$  bis  $15.0$

Die Dimensionierung des Parameterbildes und die Zuordnungsfunktion beeinflussen unmittelbar die Genauigkeit der gesuchten Parameter. Für jedes  $xy$ -Pixel wird nun die entsprechende Gerade (6.9-2) in das Parameterbild eingetragen, wobei mitgezählt wird, wie oft ein  $kd$ -Pixel angesprochen wird. Im fertigen Parameterbild (Bild 6.9-2) kann man deutlich drei lokale Summationsmaxima erkennen. Durch Aufsuchen dieser lokalen Summationsmaxima erhält man die Parameter  $k$  und  $d$  der gesuchten Geraden. Die zunächst erhaltenen Zeilen- und Spaltenindizes können auf Grund der vorhin erfolgten Zuordnungsfunktion in  $k,d$ -Werte umgerechnet werden. Die in der folgenden Tabelle angegebenen Soll-Werte wurden visuell aus dem Eingabebild 6.9-1 abgeleitet.

	Aus dem Parameterbild abgegriffene Werte				Soll-Werte	
	Zeilenindex	Spaltenindex	$k$	$d$	$k$	$d$
1.Gerade	7.0	36.0	-1.0	14	-1.000	14.0
2.Gerade	27.0	6.0	0.5	6	0.500	6.0
3.Gerade	33.5	12.5	1.0	8	1.000	8.0

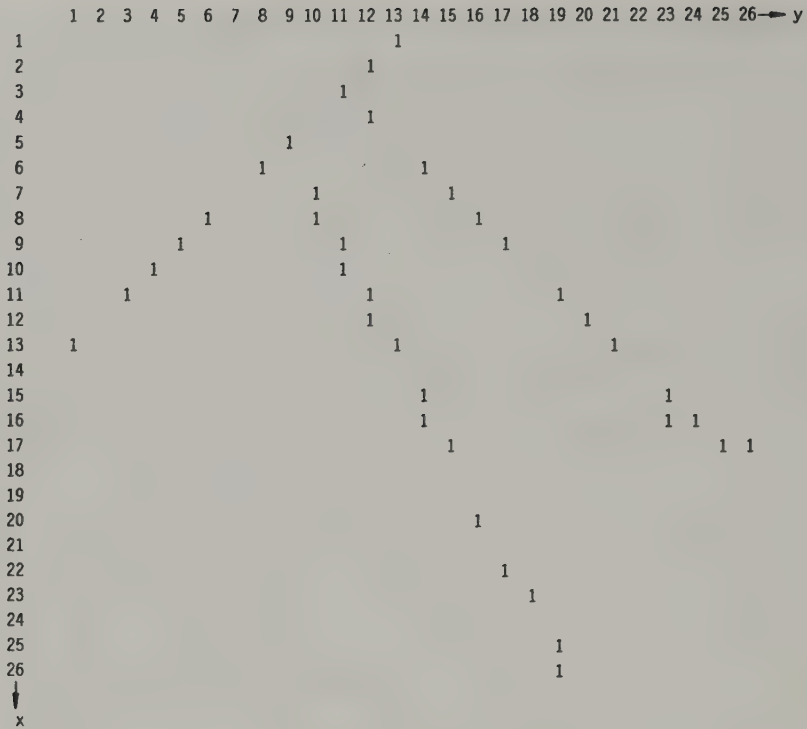


Bild 6.9-1: Binäres Bild

Durch dieses Verfahren wird nicht das zu suchende Geradenstück gefunden. Man erhält nur die Parameter all jener Geraden, entlang welcher im Bild Geradenstücke zu finden sind. Um diese zu lokalisieren, ist daher eine weitere Untersuchung des Bildes notwendig, die sich auf die Ergebnisse der Hough-Transformation stützt.



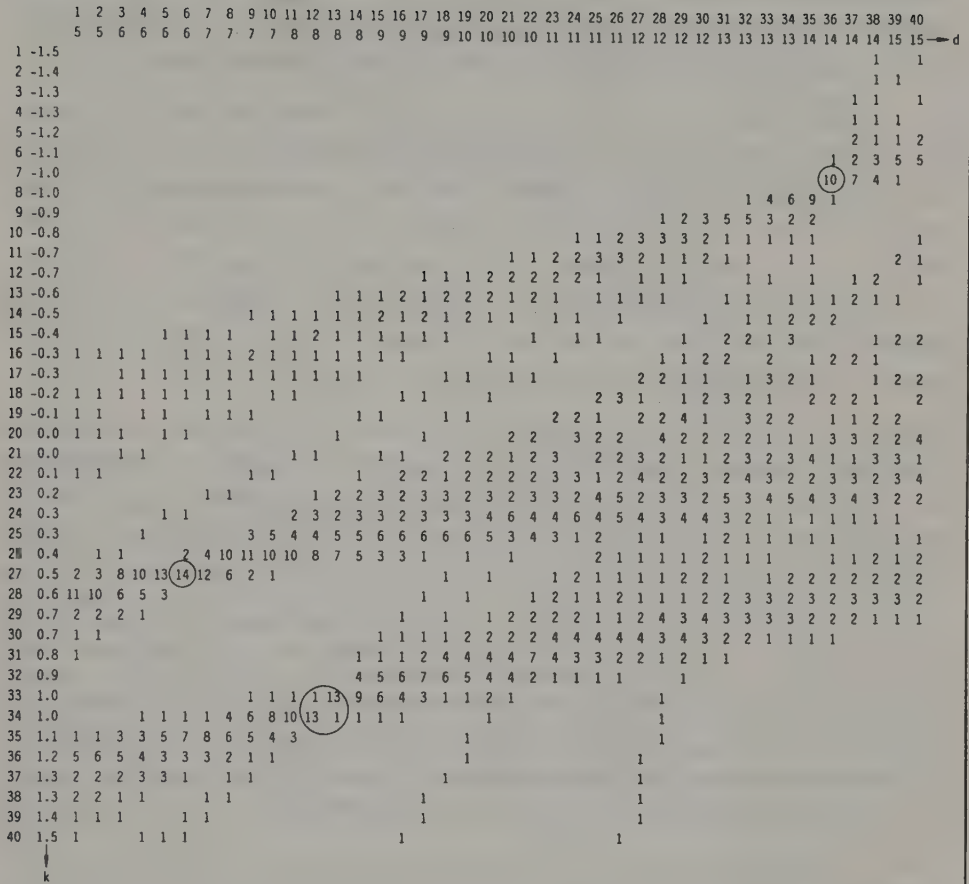


Bild 6.9-2: Parameterbild (Summationsergebnis einer Hough-Transformation des Bildes 6.9-1)

Aufgabe 6.9-1: Man wiederhole das Zahlenbeispiel ohne 1. Gerade, d.h. im x,y-Bild sind die Bildkoordinaten entlang dieser Geraden von der Hough-Transformation zu löschen.

### 6.9.3 Bildpyramiden

Analysiert man das menschliche Sehen, so erkennt man, daß man zwar ein relativ großes Gesichtsfeld zur Verfügung hat, daß man aber die eigentlichen Bilddetails nur in einem sehr kleinen Ausschnitt davon detailliert wahrnimmt und analysiert. Das menschliche Sehorgan ist ein Aufnahmesystem mit

verschiedenen Auflösungsstufen. Die feine Auflösung wird nur dort angewandt, wo man eine nähere Betrachtung für notwendig hält. Diese natürlichen Verhältnisse kann man mit Hilfe von Bildpyramiden nachvollziehen.

Unter Bildpyramiden versteht man die mehrmalige Abspeicherung eines Bildes mit jeweils unterschiedlicher geometrischer Auflösung. Bildpyramiden erhält man zum Beispiel, wenn eine Bildvorlage mit verschiedenen Pixelgrößen digitalisiert wird. Aus einem gegebenen digitalen Bild kann man rechnerisch ebenfalls Bildpyramiden aufbauen. Zu diesem Zweck faßt man mehrere Bildelemente zu einem neuen Bildelement mit schlechterer geometrischer Auflösung zusammen. Das Bild mit der höchsten Auflösung bildet die Grundfläche der Pyramide, jenes mit der schlechtesten Auflösung ihre Spitze.

Obwohl zuerst der Prozeß der Pyramidenerzeugung erfolgen muß und obwohl auch die Datenmenge gegenüber der einfachen Bildabspeicherung größer ist, kann der Mustererkennungsprozeß oft wesentlich beschleunigt werden, da in der Feinstruktur nur mehr jene Bildstellen näher untersucht werden, welche von Interesse sein könnten.

Es gibt keine einheitliche Regel, auf welche Art eine Bildpyramide aus einem gegebenen Bild rechnerisch abgeleitet werden muß. Auch hier gilt wieder der Grundsatz, daß der gewünschte Anwendungszweck das Ableitungsverfahren bestimmt. Die Ableitung der Pyramidenniveaus, d.h. das Reduktionsgesetz, entspricht einer Faltungsoperation (6.7.1), wobei nicht unbedingt jedes Bildelement des Eingangsniveaus als Referenzpunkt für die Faltung angesprochen werden muß. Das Reduktionsgesetz kann sich von Niveau zu Niveau ändern, normalerweise bleibt aber das Reduktionsgesetz für die Ableitung einer Pyramide dasselbe.

- Der geometrische Typ einer Bildpyramide wird durch die Angabe einer Reduktionskennung in der Form  $N/f$  angegeben (Kropatsch, 1988).  $N$  ist die Anzahl nebeneinanderliegender Pixel (Anzahl der Pixel im sogen. Reduktionsfenster) im Ausgangsniveau, die auf Grund des Reduktionsgesetzes zu einem Pixel im nächsthöheren Niveau zusammengefaßt werden. Bei quadratischer Pixelanordnung wird für  $N$  auch  $n \times n$  (mit  $n = \hat{=}$  Anzahl der Pixel pro Quadratseite) angegeben.  $f$  ist der Flächenreduktionsfaktor, also das Verhältnis der Bildfläche ( $\hat{=}$  Anzahl der Pixel) des Ausgangsniveaus zur Bildfläche ( $\hat{=}$  Anzahl der Pixel) des Ergebnisniveaus.

Beispiel: Der Typ  $5 \times 5/4$  sagt aus, daß immer ein Eingangsfenster von  $5 \times 5$  Pixel zu einem Ausgangspixel zusammengefaßt wurde. Der Faktor  $f = 4$  zeigt an, daß nur jede zweite Zeile und innerhalb einer Zeile nur jedes zweite Bildelement ( $2 \times 2 = 4$ ) als Mittelpunktspixel für das Reduktionsfenster verwendet wurde. Die Reduktionsfenster überlappen daher einander in jeder Richtung um 3 Pixel.

Hinweis: Genaugenommen ist zu unterscheiden zwischen geraden und ungeraden Reduktionsfenstern, d.h. zwischen Größen von  $2m \times 2m$  und  $2m+1 \times 2m+1$  ( $m \in \mathbb{N}$ ). Im ungeraden Fall fällt der Mittelpunkt des Fensters mit dem Mittelpunkt eines Pixel zusammen, im geraden Fall fällt der Mittelpunkt des Fensters in den gemeinsamen Eckpunkt vier benachbarter Bildelemente.

- Der mathematische Typ einer Pyramide wird durch die Funktion bestimmt, mit welcher die Grauwerte im Reduktionsfenster zum Grauwert des Ausgangspixels zusammengefaßt werden. Die einfachste Funktion ist die Mittelwertbildung, bei der jeder Grauwert des Eingangsbildes gleichgewichtig behandelt wird (entspricht der gleitenden Mittelwertbildung, 6.7.1).

Der Zuwachs der Datenmenge gegenüber dem Originalbild bei vollständiger Abspeicherung der Bildpyramide hängt unmittelbar mit dem Reduktionsfaktor  $f$  zusammen. Der Zuwachsfaktor  $k$  errechnet sich aus dem für geometrische Reihen gültigen Formeln mit einem Progressionsfaktor  $1/f$ :

$$k = \sum_{i=1}^n 1/f^{i-1} = \frac{1 - 1/f^n}{1 - 1/f} \quad n \dots \text{Anzahl der Niveaus} \\ (i=1 \hat{=} \text{Originalbild})$$

$$N_i = N_1 \cdot \frac{1}{f^{i-1}} \quad N_1 \dots \text{Anzahl der Pixel im Niveau } i$$

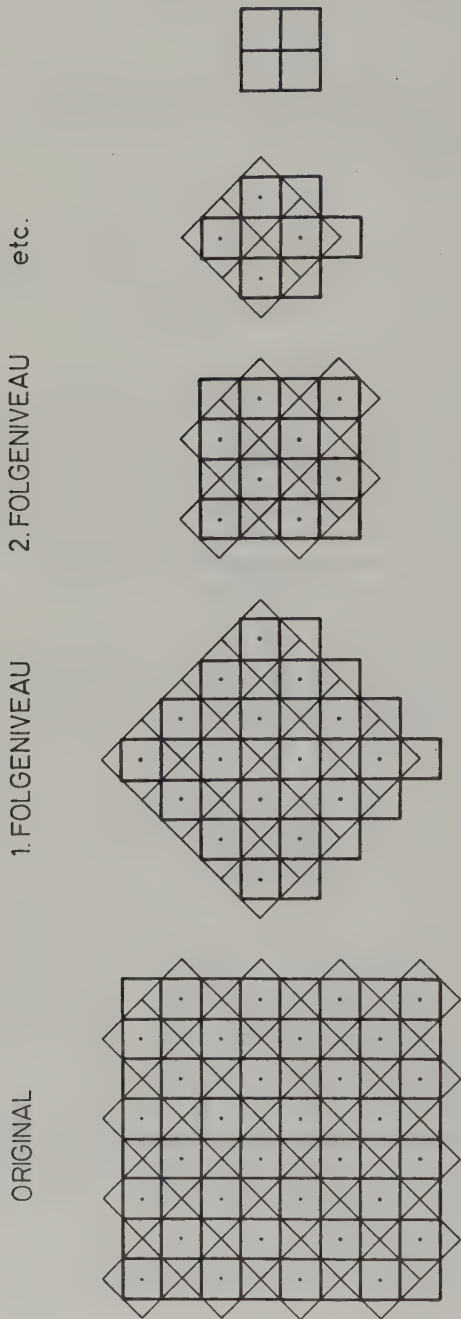
Bei einem Reduktionsfaktor  $f = 2$  etwa benötigt daher die Bildpyramide maximal (für  $n \rightarrow \infty$ ) nur doppelt soviel Platz wie das Originalbild alleine.

Wieviele Niveaus aus einem Bild ableitbar sind, hängt von der Bildgröße und vom Reduktionsfaktor  $f$  ab. Wichtig ist auch, daß man Gesetze ableiten kann, die es erlauben, von der Position eines Pixels in einem bestimmten Niveau auf die Positionen der "Urpixel" in den vorangegangenen Niveaus schließen zu können. So wird es möglich, im Laufe eines Mustererkennungsprozesses gezielt auf Bildausschnitte der besseren Auflösungsniveaus zuzugreifen und damit Bearbeitungszeit zu sparen.

Bildpyramiden können für die verschiedensten Aufgaben der Bildverarbeitung und Mustererkennung verwendet werden. Man kann sie für Korrelationszwecke (image matching), für Aufgaben der Datenkompression, für Segmentationsalgorithmen, für Bewegungsdetektoren und vieles andere mehr verwenden.

Beispiel: Es soll eine Bildpyramide von Typ  $3 \times 3/2$  erzeugt werden. Der Flächenreduktionsfaktor  $f = 2$  zeigt an, daß die Anzahl der Zeilen und Spalten jeweils nur um  $\sqrt{2}$  reduziert werden. Unter der Bedingung, daß die Mittelpunkte des Reduktionsfensters mit dem Mittelpunkt eines Pixels des vorausgegangenen Niveaus zusammenfallen müssen, kann diese Reduktion nur erreicht werden, wenn die Reduktionsfenster unter einem Winkel von  $45^\circ$  angeordnet sind. Um die gewohnte Zeilen- und Spaltenstruktur auch im folgenden Niveau erhalten zu können, erscheint das abgeleitete Bild unter  $45^\circ$  gedreht, wobei die Anzahl der Pixel pro Zeile nicht mehr konstant ist. Jedes zweite Niveau aber hat wieder die Struktur des Ausgangsbildes (Bild 6.9-3).

Aufgabe 6.9-2: Man erstelle eine Bildpyramide vom Typ  $2 \times 2/4$ . Wieviele Pixel enthält das Reduktionsfenster und wie groß ist die Überlappung der Reduktionsfenster? Gegeben sei ein Originalbild von  $4000 \times 4000$  Pixel. Wieviele Niveaus sind ableitbar und wieviele Pixel enthält die gesamte Bildpyramide (inkl. Originalbild) ?



Bildelemente im Ausgangsniveau und  
Mittelpunkte der Reduktionsfenster



Bildelemente im Folgeniveau



Bild 6.9-3: Beispiel einer Bildpyramide  
vom Typ 3x3/2



#### 6.9.4 Expertensysteme

Sogenannte Expertensysteme sind nicht auf die Bildverarbeitung beschränkt, sondern in vielen EDV-Anwendungsgebieten anzutreffen.

Die Lösung von Bildinterpretations- und Bildanalyseaufgaben erfolgt in mehr oder weniger komplizierten Einzelschritten. Die Reihenfolge der Einzelschritte, die Wahl der zu verwendeten Prozeduren, die Wahl ihrer Parameter und deren Wertzuweisungen sind im wesentlichen abhängig von

- der gestellten Aufgabe (z.B. Waldschadensklassifikation, Korrelation korrespondierender Bildbereiche),
- der Art der vorhandenen Unterlagen (z.B. multispektrale Satellitenbilder, Zusatzinformationen),
- der Qualität des Bildmaterials (z.B. verrauschte Bilder, verzerrte Bilder) und
- von Zwischenergebnissen, die sich im Verlaufe des Analyseprozesses ergeben.

Universell einsetzbare Bildverarbeitungssysteme sind umfangreich, da eine Vielzahl von Bearbeitungsmöglichkeiten vorgesehen werden muß. Um einen bestimmten Anwenderkreis ansprechen zu können, werden deshalb spezialisierte Bildverarbeitungssysteme angeboten, die die wesentlichen Bedürfnisse der jeweiligen Fachleute erfüllen (z.B. Systeme für medizinische Anwendungen, für Zwecke der Fernerkundung, für Materialprüfung u.v.a.m.). Aber auch spezielle Interpretationsaufgaben (z.B. in der Mustererkennung) sind oft kompliziert und bestehen aus vielen Einzelschritten mit einer großen Anzahl von wählbaren Parametern.

Die Verbreitung universeller und/oder komplexer Systeme scheitert oft an der Kompliziertheit der Handhabung. Um diese Systeme trotzdem einem größeren Anwenderkreis zur Verfügung stellen zu können, werden sogenannte Expertensysteme eingesetzt. Die Erfahrungen von Experten auf den jeweiligen Wissensgebieten werden eingebracht, um den Ablauf einer Bildinterpretation und Bildanalyse zu steuern.

Eine derart programmierte Unterstützung des Benutzers kann auf unterschiedlichem Niveau erfolgen:

- Auf niederem Niveau: Es steht eine Hilfsfunktion zur Verfügung, die jederzeit aufgerufen werden kann und welche nicht nur einen kommentierenden oder allgemein informierenden Text ausgibt, sondern welche einen Vorschlag über die im Augenblick sinnvolle Vorgangsweise macht (Hinweise auf Verarbeitungsschritte, Wahl von Parametern und Werten). Der Programmbenutzer entscheidet aber letztlich über die Vorgangsweise. Die Universalität des Systems bleibt weitgehend erhalten und der wenig erfahrene Benutzer erhält eine sinnvolle Unterstützung. Für den unerfahrenen Benutzer ist die Unterstützung oft noch zu wenig, da die Vielfalt der verbleibenden Möglichkeiten immer noch verwirrend sein kann.
- Auf höherem Niveau: Es erfolgt eine stärkere Ausrichtung auf ein spezielles Problem und auch eine stärkere Automation im Ablauf. Die Aufrufe der Prozeduren und die Wertzuweisungen werden in Abhängigkeit der vorangegangenen Schritte und Zwischenergebnisse gesteuert. Außerdem ist es möglich, daß das System Erfahrungen, die im Laufe der Zeit (z.B. in Form von Resultaten, die von einem Experten verifiziert wurden) gewonnen werden, bei Folgearbeiten berücksichtigt ("lernfähige Systeme"). Der Einfluß des Benutzers wird etwas zurückgedrängt.

Obwohl eine automatisierte und problemorientierte Unterstützung sehr weitreichend sein kann, ist es im allgemeinen nicht möglich, alle Erfahrungen



und Entscheidungen eines Experten in solche Systeme einzubringen. Die große Vielfalt von Problemstellungen und Lösungsvarianten kann in keinem Programmsystem berücksichtigt werden. Automaten führen daher in den meisten Fällen zu einer Einschränkung der Universalität und führen auch nicht unbedingt zum optimalen Ergebnis. Expertensysteme erlauben eine Lösung von komplexen Aufgaben auf universellen Systemen auch durch einen Nichterfahrenen; den Experten vollkommen ersetzen können sie aber nicht. Der Begriff "Expertensystem" ist daher nur bedingt berechtigt.

#### 6.9.5 Mustererkennung mit Hilfe eines neuronalen Netzwerkes

In neuerer Zeit werden für Mustererkennungszwecke sogenannte neuronale Netzwerke eingesetzt. Diese Strukturen erscheinen vor allem für Expertensysteme sehr vielversprechend zu sein. Es handelt sich dabei um Netze untereinander stark verknüpfter Primitivprozessoren (sog. Units). Die Units empfangen Signale von anderen Units des Netzes, verarbeiten diese lokal auf Grund einer vorgegebenen Funktion und senden das Ergebnis an weitere Units. Ein Netz besteht im wesentlichen aus drei Arten von Units, den Inputunits (die Eingabewerte für diese sind z.B. die Grauwerte der Bildelemente), den "versteckten" Verarbeitungunits (hidden units; sie erhalten im Fall einfacher "feed-forward-Netze" die Eingabewerte von den Inputunits oder anderen Verarbeitungunits) und den Outputunits (diese enthalten das Ergebnis des Interpretationsprozesses). Ein neuronales Netz kann auf vielfältige Weise aufgebaut werden; gängig u.a. ist die Anordnung der Units in Ebenen (layers). Demnach gibt es den "input layer", ein oder mehrere "hidden layers" und den "output layer". Bild 6.9-4 zeigt den Typ eines "feed-forward-Netzes", in welchem der Informationsfluß beim Klassifizierungsprozeß in Vorwärtsrichtung läuft. Beginnend vom "input layer" erfolgt die Berechnung in den verschiedenen Niveaus der "hidden layer" und endet beim "output layer".

Auf Grund der zahlreichen Verbindungen innerhalb des Netzes kann jede Unit während des Lernens mehrmals angesprochen werden; sie erhält neue Eingabewerte und liefert neue Ausgabewerte. Den Verbindungen selbst sind Gewichte zugeordnet, die entweder fest vorgegeben sind oder aber auch im Laufe eines Lernprozesses verändert werden dürfen. Aus den Eingabewerten und aus den Gewichten der Eingabeverbindungen wird innerhalb jeder Unit ein Wert berechnet (z.B. durch gewichtete Mittelung), der dann mit Hilfe einer Aktivierungsfunktion in die sogenannte Aktivierung der Unit umgerechnet wird. Der Wert dieser Aktivierung oder unter Umständen eine weitere funktionale Verarbeitung dieses Wertes liefert den Output der jeweiligen Unit. Dieser Prozeß kann unter Berücksichtigung einer "Merkfähigkeit" der Units allgemein folgendermaßen formuliert werden:

$$akt_j(t) = f\left(\sum_i w_{ij} \cdot o_i + c \cdot akt_j(t-1)\right)$$

- mit  $w_{ij}$  ... Gewicht der Verbindung zwischen Unit  $i$  und Unit  $j$   
 $akt_j(t)$  ... Aktivierung der Unit  $j$  vom Zeitpunkt  $t$   
 $o_i$  ... Outputwert der Unit  $i$  (ist Inputwert der Unit  $j$ )  
 $f()$  ... Aktivierungsfunktion (im allgemeinen nicht linear)  
 $c$  ... Konstante, die das "Vergessen" berücksichtigt.

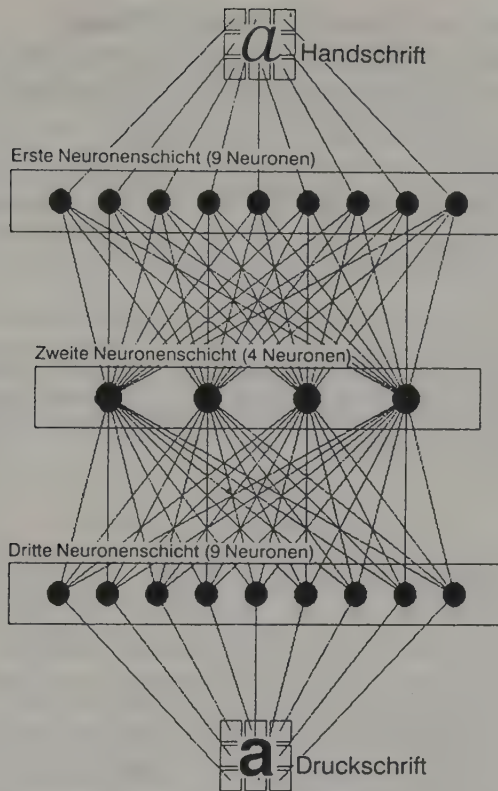


Bild 6.9-4: Prinzipskizze eines sogenannten neuronalen "feed-forward-Netzwerkes" (Humpert, 1989)

Der Verarbeitungsvorgang innerhalb des Netzes wird solange fortgesetzt, bis sich die Aktivierungen innerhalb der Units nicht mehr wesentlich verändern. Eine automatische Gewichtsveränderung (auch als Lernalgorithmus bezeichnet) kann nach einer einfachen Regel erfolgen (Hebb, 1949), die besagt, daß das Gewicht einer Verbindung erhöht wird, wenn die zwei verbundenen Units stark aktiviert sind und umgekehrt.

Das gesamte Netz muß zuerst auf eine bestimmte Mustererkennung trainiert werden. Es besteht die Möglichkeit des überwachten und des unüberwachten Lernvorganges. Für das überwachte Lernen werden den Inputunits Muster vorgegeben und in den Outputunits die gewünschten Ergebnisse gespeichert (Bild 6.9-4). Die Gewichte der Verbindungen werden dann aufgrund von Fehlerrückmeldungen so lange verändert, bis das richtige Ergebnis in den Outputunits erhalten wird. Beim Hinzulernen neuer Muster muß beachtet werden, daß das bisher Gelernte nicht vergessen wird. Der Vorgang läuft auf einen Optimierungsprozeß hinaus, bei welchem es darum geht, möglichst viele Testmuster im "Gedächtnis" zu behalten. Ist die Gewichtseinstellung beendet (= Ende

der Lernphase), beginnt die eigentliche Mustererkennung.

In der Praxis zeigt sich, daß das Lernverhalten sehr stark von der Anzahl der "hidden layers" und der Anzahl der "hidden units" innerhalb der "layer" abhängt. Mit einer zu geringen Anzahl von "hidden units" ist das Netzwerk nicht lernfähig. Mit einer zu hohen Anzahl steigt nicht nur der Berechnungsaufwand um ein Vielfaches an, es zeigt sich auch, daß zwar das Lernverhalten sehr gut ist (d.h. die vorgelegten Inputmuster können eindeutig den vorgelegten Outputmustern zugeordnet werden), die Generalisierungsfähigkeit aber abnimmt (d.h. ein neues, nicht in der Trainingsmenge enthaltenes Muster kann unter Umständen nicht klassifiziert werden). (Bischof, Pinz, 1989).

Neuronale Netzwerke werden derzeit auf den konventionellen, sequentiell oder nur wenig parallel arbeitenden Rechnern programmiert. Lernprozeß und Klassifizierungsvorgang sind daher gegenwärtig noch sehr zeitaufwendig und weit von einer Echtzeitverarbeitung entfernt. Ideal wäre ein Netz realisiert, wenn für jede Unit oder für jede Verbindung hardwaremäßig ein eigener Prozessor zur Verfügung stünde.

## 6.10 Korrelation

Unter Korrelation versteht man in der digitalen Bildverarbeitung Verfahren, die vorgegebene Bilddetails - in Form eines invarianten Referenzbildes - in einem anderen Bild auffinden und optimal einpassen. Im Englischen wird daher der treffendere Begriff "image matching" verwendet.

Auf dem Gebiet der Fernerkundung finden die Korrelationsmethoden Anwendung

- bei der automatisierten Auswertung von Stereobildpaaren (z.B. für die automatische Erfassung digitaler Geländemodelle oder zur Unterstützung des Auswerters beim Aufsetzen der Meßmarke auf die Geländeoberfläche im Stereomodell) und
- bei der Auffindung und Messung von Paßpunkten in Satellitenbildern zum Zwecke der geometrischen Rektifizierung, wobei die Paßpunkte in einer Paßpunktdatenbank in Form von Referenzmatrizen vorliegen.

### 6.10.1 Verschiedene Korrelationsfunktionen

Die beiden zu korrelierenden Bilder sollen in der Folge als Suchbild (Bild, in dem eine bestimmte Stelle gefunden werden soll) und als Referenzbild (Bild, in dem eine zu suchende Stelle definiert wird) bezeichnet werden. Da ein einziges Bildelement zuwenig Information enthält, um korreliert werden zu können, müssen immer mehr oder weniger große Bildflächen betrachtet werden. Das Referenzbild ist in der Regel eine kleine Bildmatrix, die wir Referenzmatrix nennen (auch die Bezeichnung Mustermatrix ist verbreitet). Das Suchbild ist dagegen eine sehr große Bildmatrix.

Das zentrale Bildelement der Referenzmatrix repräsentiert den sogenannten Referenzpunkt, dessen Positionierung im Suchbild gefunden werden soll. Zu diesem Zweck positioniert man die Referenzmatrix zunächst an einer (beliebigen) Stelle im Suchbild und berechnet aus den korrespondierenden Grauwerten der beiden Bildmatrizen den Korrelationswert. Der Vorgang wird solange wiederholt - wobei die Referenzmatrix jeweils um eine Pixelposition verschoben wird - bis das gesamte Suchbild bzw. ein "verdächtiger" Ausschnitt des Suchbildes bearbeitet ist. Das Ergebnis ist eine Korrelationsfunktion in Abhängigkeit der beiden Indizes des Suchbildes. An der gesuchten Positionierung des Referenzpunktes hat die Korrelationsfunktion ein Extremum.

Aus rechentechnischer Sicht ist die Korrelation sehr eng mit der Faltung, also der Filterung im Ortsbereich (6.7.1), verwandt. (In der Formel (6.7-2) sind allerdings die negativen Vorzeichen vor  $k$  und  $l$  durch positive Vorzeichen zu ersetzen.) Die Referenzmatrix entspricht der Filtermatrix und als Faltungsoperation dient ein Korrelationsalgorithmus. Das "gefaltete" Bild enthält als Grauwerte die Korrelationswerte; das "gefaltete" Bild entspricht der diskretisierten Korrelationsfunktion.

Nachfolgende Aufstellung zeigt einige Korrelationsalgorithmen. Der Unterschied zwischen diesen Algorithmen liegt im wesentlichen in der Zuverlässigkeit des Korrelationswertes und in der Geschwindigkeit, mit welcher dieser Wert bestimmt werden kann. Die Geschwindigkeit stellt einen wesentlichen Faktor dar, da für viele Anwendungszwecke die Echtzeitauswertung angestrebt wird. Geht es hauptsächlich darum, vorgegebene Formen aufzufinden, sollte der Korrelationsalgorithmus auch eine Grauwertskalierung vornehmen (Dowman, Haggag, 1978).

#### Korrelationsalgorithmus

Korrelationskoeffizient

$$\sigma_{1,2} = \frac{\Sigma(g_1 - \bar{g}_1)(g_2 - \bar{g}_2)}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} = \frac{\Sigma(g_1 - \bar{g}_1)^2 \cdot \Sigma(g_2 - \bar{g}_2)^2}{\sqrt{\Sigma(g_1 - \bar{g}_1)^2 \cdot \Sigma(g_2 - \bar{g}_2)^2}}$$

$\bar{g}_1, \bar{g}_2 \hat{=}$  arithmetischer Mittelwert der Grauwerte des Bildes 1 bzw. Bildes 2

Mittlere relative Grauwertdifferenzen

$$\frac{\Sigma(|g_1 - g_2| / (g_1 + g_2))}{n}$$

( $n \hat{=}$  Anz.d.verw.Pixel)

#### Anmerkung

Der Wertebereich liegt zwischen -1 und +1. Der größte Wert zeigt die gesuchte Positionierung an.

Vorteil: Der Korrelationskoeffizient ergibt eine sehr gute Zuverlässigkeit. Es erfolgt eine automatische Grauwertskalierung.

Nachteil: Lange Rechenzeiten.

Der kleinste Wert zeigt die gesuchte Positionierung an.

Vorteil: Einfache Berechnung. Gewisse Skalierung.

Nachteil: Keine gute Differenzierbarkeit, wenn größere Skalierungsunterschiede zwischen Suchbild und Referenzbild vorkommen.



Quadratischer Mittelwert der  
Grauwertdifferenzen

$$\sqrt{\frac{\sum (g_1 - g_2)^2}{n}}$$

(n = Anz.d.verw.Pixel)

Der kleinste Wert zeigt die gesuchte  
Positionierung an.

Vorteil: Gute Differenzierung wegen des  
Quadrierens. Relativ einfache  
Möglichkeit des Einbaues in ein  
verfeinertes Korrelationsverfahren  
mit Hilfe einer Ausgleichung.

Nachteil: Keine Skalierung (sie kann  
aber im Ausgleichungsansatz berücksich-  
tigt werden).

Von den oben angeführten Algorithmen haben der Korrelationskoeffizient und der quadratische Mittelwert der Differenzen größere Bedeutung erlangt. Der erste wegen seiner hohen Zuverlässigkeit, der zweite wegen seiner einfachen Berechnung und des einfachen Einbaues in verfeinerte Verfahren mit Hilfe von Ausgleichungsansätzen.

Beispiel: In einem Bild in der Größe von 10 x 10 Bildelementen soll ein Detail gesucht werden, welches in Form einer Referenzmatrix von 3 x 3 Bildelementen vorgegeben ist.

```

1 2 2 2 3 3 4 4 5 5
1 2 3 2 3 3 4 4 5 5
3 3 3 3 3 4 4 4 5 3
1 2 3 2 9 3 2 3 1 2
2 2 2 9 9 9 2 2 3 3
2 2 3 9 3 3 3 2 2
4 4 5 5 4 4 5 6 3 2
4 5 5 4 4 6 6 1 5 3
5 4 5 6 4 5 1 1 1 4
1 2 2 2 3 2 4 1 4 5

```

```

1 9 1
9 9 9
1 9 1

```

Referenzmatrix (Kreuz)

Suchbild

Ergebnis: Die Pixelpositionen (Zeile,Spalte) der drei besten Einpassungen und die berechneten Korrelationswerte r, die mit den oben erwähnten Korrelationsalgorithmen erhalten wurden, sind:

Korrelationskoeffizienten: (3,3), r=1.00; (5,5), r=0.99; (9,8), r=-0.96  
Relative Differenzen: (5,5), r=0.19; (7,7), r=0.36; (8,6), r=0.37  
Quadr.Mittelw.d.Diff.: (5,5), r=1.05; (8,6), r=3.62; (2,9), r=3.76

Das nicht markante aber eindeutige Kreuz in Position (3,3) konnte nur vom Korrelationskoeffizienten erkannt werden, ebenso das "negative" Kreuz in Position (9,8). Solche negative Ausprägungen können von den beiden anderen Algorithmen vom Prinzip her nicht gefunden werden. Das markante aber nicht ganz saubere Kreuz auf (5,5) wurde von allen drei Verfahren gut erkannt. Die sonst noch gefundenen Positionen (8,6), (2,9) und (7,7) sind nicht gerechtfertigt. Der Korrelationskoeffizient ist eindeutig der beste Indikator. Je ähnlicher sich die beiden Matrizen in grauwertmäßiger Hinsicht sind, desto besser eignet sich der quadratische Mittelwert.

Aufgabe 6.10-1: Man wiederhole die Berechnungen des vorhergehenden Beispiels, wobei in der Referenzmatrix die Zahlenwerte 1 und 9 getauscht werden. Man diskutiere die Ergebnisse im Vergleich mit den Ergebnissen des Beispiels.



### 6.10.2 Subpixeleinpassung durch Ausgleichung nach kleinsten Quadraten

Die bisher besprochene Korrelationsmethode liefert - unabhängig vom Korrelationsalgorithmus - als Ergebnis der besten Einpassung nur die ganzzahlige Position des Referenzpunktes. Außerdem ist das Ergebnis nur dann von guter Qualität, wenn sowohl Richtung als auch Maßstab des Referenzbildes mit dem Suchbild übereinstimmen. Denkt man an die photogrammetrische Auswertung von Stereobildern, können diese optimalen Voraussetzungen nur näherungsweise gelten. Die Geländeneigungen und die Kameraorientierungen führen zu geometrischen Verzerrungen.

Die bestenfalls erreichbare Genauigkeit von einer Pixelposition ist in vielen Fällen nicht ausreichend. Die vergleichbare (analoge) Meßgenauigkeit in photographischen Bildern liegt bei wenigen Mikrometern. Eine Bilddigitalisierung mit derart kleinen Bildelementen ist unrealistisch, erstens da die anfallenden Datenmengen nur mehr schwer zu bewältigen wären, und zweitens da das Signal/Rauschverhältnis (3.2.1.3) des zum Digitalisieren verwendeten Sensors zu ungünstig würde. Auf Grund verschiedener Untersuchungen wurde eine Pixelgröße von ca. 10 bis 20  $\mu\text{m}$  in Schwarzweißbildern als günstigste Größe gefunden. Eine Meßgenauigkeit in dieser Größenordnung ist aber deutlich schlechter als die derzeit konventionell erreichbare Genauigkeit.

Daher befassen sich schon seit längerem verschiedene Untersuchungen damit, wie man durch Berücksichtigung der unterschiedlichen radiometrischen und geometrischen Verhältnisse zwischen Suchbild und Referenzbild die Einpaßgenauigkeit bis in den Subpixelbereich steigern könnte. Einer der Ansätze (Ackermann, 1983, Förstner, 1985) soll hier näher besprochen werden.

Als Voraussetzung gelte, daß Suchbild und Referenzbild bereits näherungsweise eingepaßt sind. Eine Möglichkeit bestünde in der zweidimensionalen Korrelation auf Pixelgenauigkeit, wie sie im Abschnitt 6.10.1 besprochen wurde. Eine andere Möglichkeit zielt darauf ab, daß man die lokalen Interessensbereiche über geometrische Zuordnungen finden kann (z.B. in manchen Zweibildauswertegeräten (5.1.4.2) kann man korrespondierende Bildausschnitte mit CCD-Kameras (3.2.2) digitalisieren. Der Auswerter selbst stellt die zu korrelierende Stelle in den Bildern bereits näherungsweise ein. Die Feineinstellung erfolgt dann durch den automatischen Korrelationsalgorithmus.)

Um das Verfahren zu verdeutlichen, soll zuerst eine eindimensionale Korrelation behandelt werden. Als Korrelationsalgorithmus wird der quadratische Mittelwert der Grauwertdifferenzen verwendet.

Suchbildmatrix und Referenzmatrix haben die gleiche Größe (z.B. digitale Daten einer CCD-Kamera). Da die beiden Bilder bereits näherungsweise eingepaßt wurden, wird diesen Bildern das gleiche Koordinatensystem zugrunde gelegt.

Es seien die Grauwerte des 2.Bildes,  $g_2(x)$ , durch eine lineare Beziehung (Maßstab und Verschiebung) in die Grauwerte des 1.Bildes,  $g_1(x)$ , überführbar, d.h. es gelte:

$$g_2(x) = g_1(a \cdot x + b) \quad (6.10-1)$$

Eine eventuell vorhandene Differenz in Kontrast und Helligkeit kann - in Anlehnung an die Formel (6.6-1) - durch zwei weitere Unbekannte berücksichtigt werden:

$$g_2(x) = c \cdot g_1(a \cdot x + b) + d. \quad (6.10-2)$$

Unter Aufspaltung von  $a$  in  $a_0 + \delta a$  und  $b$  in  $b_0 + \delta b$  ergibt sich:

$$\begin{aligned} g_2(x) &= c \cdot g_1((a_0 + \delta a) \cdot x + b_0 + \delta b) + d \\ &= c \cdot g_1(a_0 \cdot x + b_0 + \delta a \cdot x + \delta b) + d = c \cdot g_1(x_0 + \delta x) + d \end{aligned}$$

Diese Gleichung kann durch Reihenentwicklung in der Umgebung des Wertes  $x_0 = a_0 \cdot x + b_0$  in folgende Form gebracht werden:

$$g_2(x) \approx g(x) = c \cdot g_1(x_0) + c \cdot g_1'(x_0) \cdot (\delta a \cdot x + \delta b) + d \quad (6.10-3)$$

Für die Aufstellung der Verbesserungsgleichungen (Anhang 6.4-1) muß die Linearisierung weiter getrieben werden. Die notwendigen partiellen Ableitungen lauten:

$$\begin{aligned} \partial g / \partial a &= c_0 \cdot g_1'(x_0) \cdot x & \partial g / \partial b &= c_0 \cdot g_1'(x_0) \\ \partial g / \partial c &= g_1(x_0) & \partial g / \partial d &= 1 \end{aligned} \quad (6.10-4)$$

Die Verbesserungsgleichungen haben damit folgende Gestalt:

$$v(x) = \left( \frac{\partial g}{\partial a} \right)^0 \cdot \delta a + \left( \frac{\partial g}{\partial b} \right)^0 \cdot \delta b + \left( \frac{\partial g}{\partial c} \right)^0 \cdot \delta c + \left( \frac{\partial g}{\partial d} \right)^0 \cdot \delta d - (g_2(x) - g^0(x)), \quad (6.10-5)$$

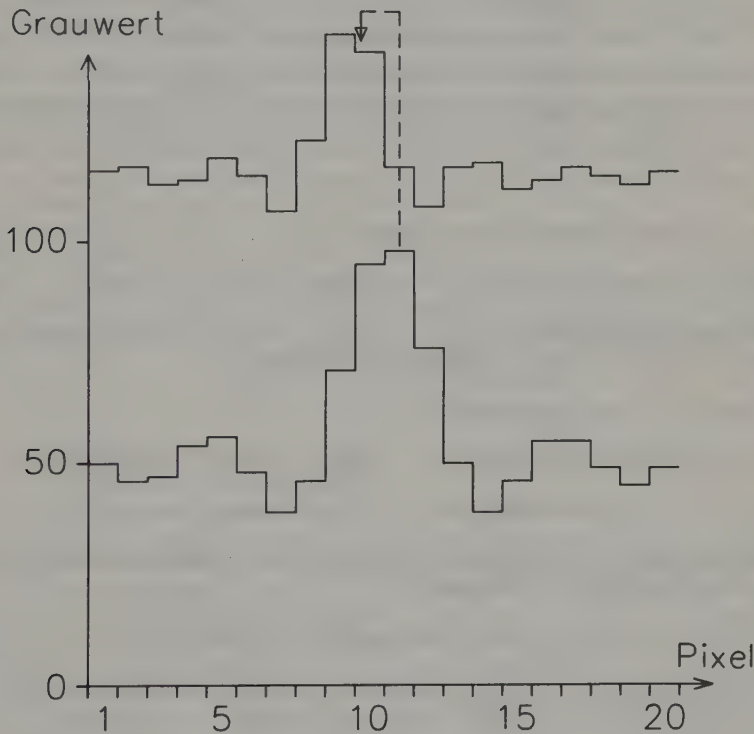
wobei:

$\hat{g}_2(x)$  = gegebener Grauwert an der Stelle  $x$  im 2. Bild  
 $\hat{g}^0(x)$  = der mit den Näherungswerten  $a_0$  und  $b_0$  an der Stelle  $x_0 = a_0 \cdot x + b_0$  entnommene Grauwert des 1. Bildes, wobei ausgehend von den Grauwerten für die Pixelmittelpunkte eine Interpolation - eventuell höherer Ordnung (6.4.1c) - durchzuführen ist. Dieser interpolierte Grauwert ist noch zusätzlich mit den Näherungswerten  $c_0$  und  $d_0$  nach Gleichung (6.10-2) umzuformen.  
 $\hat{g}_1'(x_0)$  = Neigung des Grauwertprofils des 1. Bildes an der Stelle  $x_0 = a_0 \cdot x + b_0$ , die aus der dort auftretenden Grauwertdifferenz  $\Delta g$  und der Bildelementgröße  $\Delta x$  wie folgt zu berechnen ist:  
 $\hat{g}_1'(x_0) = \Delta g / \Delta x$ .

Eine Verbesserungsgleichung vom Typ (6.10-5) kann für jedes Pixelpaar aufgestellt werden. Da bei der Ausgleichung nach kleinsten Quadraten die  $\Sigma v$  ein Minimum wird, wird bei diesem Verfahren der quadratische Mittelwert der Grauwertdifferenzen als Korrelationsmaß im Sinne des Abschnittes 6.10.1 benutzt. Die Ausgleichung beginnt mit den Näherungswerten  $a_0 = 1$ ,  $b_0 = 0$ ,  $c_0 = 1$  und  $d_0 = 0$ . Mit den verbesserten Näherungswerten  $a_0 = a_0 + \delta a$ ,

$b_0 = b_0 + \delta b$ ,  $c_0 = c_0 + \delta c$ ,  $d_0 = d_0 + \delta d$  nach der ersten Iteration werden dann die partiellen Ableitungen (6.10-4) sowie  $g^0(x)$  und  $g_1^0(x_0)$  neu berechnet. Anschließend erfolgt die zweite Iteration der Ausgleichung usw. Das eigentliche Ergebnis sind die Werte für  $a$  und  $b$ , die den Zusammenhang zwischen den Pixelpositionen der zwei Bildmatrizen herstellen. Die Werte für  $c$  und  $d$  sind uninteressant. Sie wurden nur als Unbekannte eingeführt, um eine optimale grauwertmäßige Anpassung und damit einen verlässlichen Korrelationswert zu erhalten.

**Beispiel:** Im folgenden soll die maximale Übereinstimmung zweier vorgegebener, im Bild 6.10-1 dargestellter Bildfunktionen (Pixelzeilen) berechnet werden. Die Darstellung erfolgt aus Gründen des besseren Erkennens in Form von Treppenfunktionen. Die Treppenweite entspricht der Pixelgröße. In der Ordinate ist der Grauwert aufgetragen. Die obere Treppenkurve wird als Suchbild verwendet, die untere als Referenzbild. Als Referenzpunkt wurde das Bildelement 11 gewählt.



*Bild 6.10-1: Beispiel für ein subpixelgenaue Korrelation  
oben: Suchbild, unten: Referenzbild*

Nach Lösung der Korrelationsaufgabe erhält man die Koeffizienten  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , anhand welcher das Referenzbild optimal in das Suchbild eingepaßt werden kann. Für obiges Beispiel ergeben sich folgende Werte:  $a = 1.37$ ,  $b = -2.30$ ,  $c = 0.62$  und  $d = 84.37$ . Diese Werte differieren leicht, je nachdem welches Interpolationsverfahren man für den notwendigen Resamplingvorgang verwen-

det. Für das Referenzbildelement 11 erhält man das entsprechende Bildelement 9.67 im Suchbild. (Es wurde angenommen, daß die Pixelbreite des  $i$ -ten Pixels dem Intervall  $[i-0.5, i+0.5[$  entspricht.)

Aufgabe 6.10-2: Man stelle für obiges Beispiel die Verbesserungsgleichungen auf. Die Grauwerte der Pixel entnehme man dem Bild 6.10-1.

Dehnt man dieses Verfahren auf den zweidimensionalen Fall aus, so treten an die Stelle des Streckungsparameters  $a$  und des Verschiebungsparameters  $b$  Parameter einer zweidimensionalen Transformation. Da die Korrelation jeweils für kleine Bildstellen erfolgt, können die entsprechenden Objektstellen näherungsweise als schräg liegende Ebenen angesehen werden. Die Bilder sind daher zentralperspektivische Abbildungen von Ebenen; außerdem ist ein Bild in das andere ebenfalls durch eine projektive Transformation überführbar (A 6.2). Die bekannte 8-parametrige projektive Transformation (A (2-14)) wäre daher für den zweidimensionalen Korrelationsansatz geeignet. Auf Grund der geringen Ausdehnung darf sie jedoch durch die einfacher handhabbare 6-parametrige Affintransformation (6.4-13) ersetzt werden. Die Kontrastfunktionsparameter  $c$  und  $d$  können in der obigen Form beibehalten werden.

Analog zu der Formel (6.10-2) gilt dann:

$$g_2(x,y) = c \cdot g_1(a_{11}x + a_{21}y + b_1, a_{12}x + a_{22}y + b_2) + d \quad (6.10-6)$$

Ausgehend von Näherungswerten ( $a_{11}^0, \dots, b_1^0, \dots$ ) für die Transformationsparameter ( $a_{11}, \dots, b_1, \dots$ ) erfolgt folgende Umformung:

$$g_2(x,y) = c \cdot g_1(x_0 + \delta x, y_0 + \delta y) + d \quad (6.10-7)$$

$$\begin{aligned} \text{wobei:} \quad x_0 &= a_{11}^0 x + a_{21}^0 y + b_1^0, & \delta x &= \delta a_{11} x + \delta a_{21} y + \delta b_1 \\ y_0 &= a_{12}^0 x + a_{22}^0 y + b_2^0, & \delta y &= \delta a_{12} x + \delta a_{22} y + \delta b_2 \end{aligned}$$

Die Linearisierung durch Reihenentwicklung in der Umgebung von  $(x_0, y_0)$  und Abbruch nach dem ersten Glied ergibt:

$$g_2(x,y) \approx g(x,y) = c \cdot g_1(x_0, y_0) + c \cdot g'_{1x}(x_0, y_0) \delta x + c \cdot g'_{1y}(x_0, y_0) \delta y + d \quad (6.10-8)$$

Die Koeffizienten für die Verbesserungsgleichungen ergeben sich mit Hilfe folgender partieller Ableitungen:

$$\begin{aligned} \frac{\partial g}{\partial a_{11}} &= c \cdot g'_{1x}(x_0, y_0) \cdot x & \frac{\partial g}{\partial a_{12}} &= c \cdot g'_{1y}(x_0, y_0) \cdot x \\ \frac{\partial g}{\partial a_{21}} &= c \cdot g'_{1x}(x_0, y_0) \cdot y & \frac{\partial g}{\partial a_{22}} &= c \cdot g'_{1y}(x_0, y_0) \cdot y \\ \frac{\partial g}{\partial b_1} &= c \cdot g'_{1x}(x_0, y_0) & \frac{\partial g}{\partial b_2} &= c \cdot g'_{1y}(x_0, y_0) \\ \frac{\partial g}{\partial c} &= g_1(x_0, y_0) & \frac{\partial g}{\partial d} &= 1 \end{aligned}$$



Die Verbesserungsgleichungen lauten dann:

$$v(x,y) = \left( \frac{\partial g}{\partial a_{11}} \right)^0 \cdot \delta a_{11} + \left( \frac{\partial g}{\partial a_{12}} \right)^0 \cdot \delta a_{12} + \dots + \left( \frac{\partial g}{\partial d} \right)^0 \cdot \delta d - (g_2(x,y) - g^0(x,y)) \quad (6.10-9)$$

Diese Verbesserungsgleichung für den zweidimensionalen Fall entspricht der Gleichung (6.10-5) für den eindimensionalen Fall. Im Anschluß an die Verbesserungsgleichung (6.10-5) wurden Hinweise gegeben, die ohne Schwierigkeiten auf den zweidimensionalen Fall übertragen werden können.

Das vorgestellte Verfahren führt nur dann zum Erfolg, wenn die Mustermatrix und die gesuchten Bildstellen weitgehend gleiche Grauwertverteilung und gleiche Geometrie haben. Betrachtet man ein Stereobildpaar, so ist zwar die Grauwertverteilung in beiden Bildern etwa gleich (ausgenommen Differenzen infolge der unterschiedlichen Blickrichtungen (6.5.2) und infolge des zufälligen Rauschens), die geometrische Übereinstimmung entsprechender Bildstellen kann aber - insbesondere im gebirgigen Gelände - sehr beeinträchtigt sein. Für solche Fälle muß die Methode noch mehr verallgemeinert werden, worauf im Abschnitt 6.10.3 kurz eingegangen wird.

Sollen in einem Einzelbild geometrische Bilddetails gesucht werden, die durch eine vorgegebene Mustermatrix definiert sind, so ist zwar die geometrische Übereinstimmung der beiden Bilder weitgehend gegeben, aber die Grauwerte der beiden Bilder unterscheiden sich sehr stark. Dieser Fall tritt z.B. auf, wenn in einem Satellitenbild für die geometrische Rektifizierung automatisch Paßpunkte gesucht werden sollen, deren "Paßpunkt-skizzen" in Form digitaler Bildausschnitte vorliegen. Man kann in diesem Fall zwar die geometrischen Unterschiede leicht in den Griff bekommen, die Grauwertverteilung wird aber stark vom Aufnahmezeitpunkt und vom Spektralbereich geprägt. Die Schwierigkeiten bei unterschiedlichen Grauwertverteilungen können umgangen werden, indem nicht die Grauwertbilder sondern die Kantenbilder (6.6.4) oder die Phasenspektren (6.7.2) miteinander verglichen werden. Dazu gehören aber andere Korrelationsalgorithmen.

### 6.10.3 Integration von Bildzuordnung und Objektrekonstruktion innerhalb der digitalen Photogrammetrie

Die sehr aufwendige zweidimensionale Korrelation kann im Falle der Stereophotogrammetrie relativ einfach auf eine eindimensionale Korrelation zurückgeführt werden, wenn man Kernebenen und Kernstrahlen (epipolar lines) einführt (Dowman, Haggag, 1978). Vorausgesetzt ist, daß die beiden Bilder bereits relativ zueinander orientiert sind (A 4.2.3.1). Kernebenen sind Ebenen, die von den beiden Projektionszentren und einem Geländepunkt aufgespannt werden. Kernstrahlen sind die Schnittgeraden einer Kernebene mit den beiden Bildebenen. (Sind die beiden Aufnahmerichtungen parallel, so sind die Kernstrahlen parallele Geraden.) Entsprechende Kernstrahlen in einem Stereobildpaar enthalten daher die gleichen Geländedetails. Die Korrelation auf idente Geländepunkte kann also eindimensional, durch Vergleich der Grauwertverteilung entlang der beiden Kernstrahlen erfolgen. Für den eigentlichen Korrelationsvorgang bietet sich vor allem die im Abschnitt 6.10.2 besprochene eindimensionale Methode an. Nach Abschluß des Korrelationsvorganges kennt man für den Referenzpunkt die vier Bildkoordinaten, aus denen mit Hilfe der Gleichungen (5.1-11) - die Kenntnis der inneren und äußeren Orientierung vorausgesetzt - die dreidimensionalen Landeskoordinaten X,Y,Z berechnet werden können.



Ein Nachteil bei der Verwendung der Kernstrahlen liegt darin, daß die Kernstrahlen im allgemeinen nicht mit der Pixelstruktur der digitalen Bilder übereinstimmen. Eine Umordnung (resampling) der Pixel wird notwendig. Die gesuchten Grauwerte entlang den Kernstrahlen findet man durch Grauwertinterpolation. Da bei der eindimensionalen Korrelation nur Grauwertprofile betrachtet werden, muß garantiert sein, daß die zu korrelierenden Profile auch tatsächlich die entsprechende Bildinformation enthalten. Eine Ungenauigkeit in der Lage der Kernstrahlen, wie sie durch eine schlechte gegenseitige Orientierung der Bilder gegeben sein könnte, kann damit das Korrelationsergebnis entscheidend verfälschen oder eine Korrelation überhaupt unmöglich machen.

Der Trend in der digitalen Photogrammetrie geht wieder zurück zur zweidimensionalen Korrelation. Die vorgeschlagene Lösung ist sehr umfassend: Man korreliert nicht mehr in den Bildebenen, sondern im dreidimensionalen Objektraum. Zu diesem Zweck sind in das mathematische Modell unbekannte Parameter zur geometrischen Modellierung der Geländeoberfläche und unbekannte Parameter zur Modellierung der radiometrischen Verhältnisse einzuführen. Das Ergebnis ist das geometrisch und radiometrisch rektifizierte Bild sowie zusätzlich die geometrische Form der Geländeoberfläche. Einige Literaturhinweise: Ebner et al. (1987), Grün, Baltsavias (1986), Helava (1988), Wrobel (1987).

## 6.11 Digitale Bildverarbeitungsanlagen

Unter Bildverarbeitungsanlagen versteht man Systeme von Hardware (Computer, Massenspeicher, Bilddigitalisierungs- und Bildausgabegeräte) und Software (Verarbeitungsprogramme und Programmentwicklungsbibliotheken), die speziell auf die Probleme der digitalen Bildverarbeitung abgestimmt sind. Prinzipiell kann jeder Digitalrechner für Bildverarbeitungszwecke verwendet werden, obwohl eine effiziente, interaktive Bildverarbeitung sicherlich nur mit optimal aufeinander abgestimmten Komponenten erreicht werden kann.

### 6.11.1 Hardware- und Software-Konfigurationen

Waren bis vor kurzem die digitalen Bildverarbeitungsanlagen preislich noch auf sehr hohem Niveau, so werden derzeit bereits eine große Anzahl von Systemen angeboten, die auf PC (personal computer) basieren. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit kann beschleunigt werden, indem sehr rechenintensive Prozeduren hardwaremäßig gelöst werden. Im allgemeinen werden Hardwarelösungen für Algorithmen verwendet, die zum Bildverarbeitungsstandard gehören und daher keinen Programmänderungen mehr unterworfen sind. Immer häufiger werden auch Zusatzplatinen angeboten, die eigene schnelle Prozessoren enthalten und die gewisse Teile der Bildverarbeitung voll übernehmen. Der PC-interne Prozessor dient dann nur mehr als Verwalter zwischen der Zusatzplatine und den peripheren Geräten. Für die digitale Signalverarbeitung (die

digitale Bildverarbeitung ist ein spezieller Anwendungsbereich davon) existieren bereits sehr leistungsfähige Zusatzplatinen.

Im folgenden sollen die wichtigsten Komponenten einer Bildverarbeitungsanlage vorgestellt und näher beschrieben werden. Diese Aufzählung soll nur ein Beispiel sein, wie eine Anlage zusammengestellt sein kann. Sie soll auch einige Hinweise geben, die für die Beurteilung einer Bildverarbeitungsanlage wichtig sind.

#### Digitalrechner:

Bei den billigeren Anlagen wird als Basisrechner ein PC verwendet, der mit einer eigenen Platine ausgestattet wird, die einige Basisprogramme als Hardwarelösung und vor allem den Bildspeicher beinhaltet, der das auf den Bildschirm dargestellte Bild enthält. Alle anderen Bildverarbeitungsprogramme werden vom Prozessor des PC's ausgeführt. Als Massenspeicher stehen eine (oder mehrere) Harddisks sowie im Idealfall auch eine Magnetbandstation zur Verfügung. Es ist zu bedenken, daß PC-basierende Systeme nur für einen einzigen Benutzer geeignet sind (Single User-Betrieb), auch wenn ein Multiuser-Betriebssystem zur Verfügung steht. In der Bildverarbeitung reicht die Rechenkapazität eines PC's im allgemeinen nicht für einen Multiuser-Betrieb aus. Leistungsfähigere Systeme verwenden Zusatzplatinen, die sehr umfangreiche Prozeduren sehr effizient lösen können (z.B. Fourieranalysen), oder auch schnellere und leistungsfähigere Digitalrechner (z.B. Minicomputer, Workstations).

#### Magnetbandstation:

Obwohl das Magnetband im konventionellen Rechenbetrieb in letzter Zeit wesentlich an Bedeutung verloren hat, ist es nach wie vor ein wichtiges Speichermedium für Archivierungs- und Sicherungszwecke großer Datenmengen. Besonders bei Kleinrechnern der PC-Klasse sind die "Cartridge-Tapes" üblich. Sie sind in Kassettenform und daher bequem handhabbar. Für den Datenaustausch mit anderen Rechenanlagen sind sie aber nicht geeignet, da keine Standardisierung des Aufzeichnungsformats gegeben ist. Für Fernerkundungszwecke besonders wichtig ist das 1/2-inch-CCT (computer compatible tape). Die Bilddaten der bekannten Fernerkundungssatelliten (z.B. LANDSAT und SPOT) sind auf solchen Bändern erhältlich. Diese Daten werden zwar auch auf Disketten angeboten, doch eignen sich diese nur für kleinere Datenmengen. Eine LANDSAT-TM Viertelszene in allen 7 verfügbaren Kanälen besteht aus ca. 70 Mbytes (4.2.3), das entspricht etwa 2 1/3 Magnetbändern (mit einer Schreibdichte von 1600 bpi (bits per inch)) oder entspräche ca. 60 5 1/4" Disketten (1.2 Mbyte, high density). Da Computernetze eine immer wichtigere Rolle spielen, kann man auf eine eigene Magnetbandstation verzichten und dafür den PC an ein Netz anschließen, über welches auch eine Magnetbandstation erreichbar sein sollte.

#### Magnetplatte:

Eine Magnetplatte (Harddisk) als Massenspeicher ermöglicht erst das Arbeiten mit den großen Datenmengen. Die Zugriffszeiten auf Harddisks sind inzwischen relativ gering und die Speicherkapazitäten sehr groß. Inzwischen gibt es auch die Möglichkeit, Wechseldisks hoher Kapazität auf PC-Systemen zu installieren. Die Anschaffung solcher Wechseldisks ist zu überlegen, wenn eine größere Anzahl von Benutzern die Bildverarbeitungsanlage benötigt und jeder seine eigenen Bilddaten verwenden will. Greift man auf gemeinsame Daten zu, ist es sinnvoller, eine große Harddisk zur Verfügung zu stellen. Auch hier besteht wieder die Möglichkeit, über ein Computernetz die

Massenspeicher eines angeschlossenen größeren Rechners mit zu verwenden. Die Frage, wie groß eine Harddisk für Bildverarbeitungszwecke in der Fernerkundung mindestens sein soll, kann nicht genau beantwortet werden. Eine Kapazität von weniger als 80 Mbytes erscheint jedenfalls nicht sinnvoll.

#### Optische Platte:

Die optische Platte gewinnt immer mehr an Bedeutung, da durch sie große Datenmengen auf kleinstem Raum gespeichert werden können. Optische Platten in der Größe einer konventionellen Diskette haben eine Kapazität von ca. 600 Mbytes. Diese Art der Platten eignen sich besonders zum Archivieren von Daten und weniger für den Einsatz bei der Bildverarbeitung. Die Zugriffszeiten sind relativ lange. Außerdem ist derzeit nur das einmalige Beschreiben standardmäßig möglich. Löschrare und wiederbeschreibbare optische Disks sind aber bereits vorhanden.

#### Look-up-Tabellen:

Die vorhin erwähnten Look-up-Tabellen sind ein wichtiges Element des Betrachtungssystems einer Bildverarbeitungsanlage. In den Abschnitten 6.6.1 und 6.6.3 wurden bereits die Aufgaben solcher Look-up-Tabellen aufgezeigt. Sie sind meistens hardwaremäßig im Bildspeicher integriert und bieten die Möglichkeit, in Echtzeit Kontrastoperationen und Farbkodierungen durchzuführen, ohne die Originalgrauwerte eines Bildes zu verändern.

Im Falle der Kontrastoperationen in einem Farbbild gehört zu jeder der drei Bildebenen eine Look-up-Tabelle. Im Falle der Farbkodierung eines Schwarzweiß-Bildes werden einer Bildebene drei unterschiedliche Look-up-Tabellen zugeordnet. Die Look-up-Tabellen sollen dem Benutzer unmittelbar zugänglich sein.

#### Farbbildschirm: (Ergänzung zu 6.3.2)

Für die Darstellung der Bilddaten und für das interaktive Arbeiten mit ihnen dient ein Farbbildschirm. Die Bildgröße, die auf dem Monitor maximal dargestellt werden kann, liegt derzeit oft noch bei etwa 512 x 512 Pixel. Bildschirme mit 1024 x 1024, 1480 x 1024 und noch mehr Pixel werden bereits bei vielen Bildverarbeitungsanlagen eingesetzt. Die maximal darstellbare Bildmatrix ist sowohl vom Monitor selbst als auch von der Größe des Bildspeichers abhängig, in welchen das Bild eingelesen werden muß. Wie bereits im Kapitel 6.3.2 erwähnt, sollte man aber auch die Bildwiederholungsfrequenz berücksichtigen. Je mehr Pixel dargestellt werden können, desto schwerer ist eine hohe Bildwiederholungsfrequenz einzuhalten. Es ist vernünftiger, mit einer kleineren Bildschirmmatrix und flimmerfreiem Bild zu arbeiten.

Wieviele und welche Farben auf dem Bildschirm dargestellt werden können, ist von der hardwaremäßigen Bildschirmansteuerung und vor allem von der Anzahl der Bildebenen im Bildspeicher abhängig. Die Charakterisierung durch die Firmen erfolgt sehr oft durch Angabe der Anzahl der darstellbaren Farben. Wird auf 16.7 Millionen gleichzeitig darstellbare Farben hingewiesen, so ist anzunehmen, daß alle drei Bildebenen (Rot, Grün und Blau) in den üblichen Intensitätsstufen von 0 bis 255 ( $\hat{=}$  1 byte) dargestellt werden können ( $256 \cdot 256 \cdot 256 = 16.77$  Millionen). Diese Zahl scheint zwar für den normalen Bedarf mehr als ausreichend zu sein; sie deutet aber indirekt darauf hin, daß in einem solchen System die drei Farbauszüge unabhängig voneinander dargestellt werden können. Die Ergebnisse von Grauwert- bzw. Farbwertmanipulationen im Bildspeicher werden daher auch unmittelbar auf dem Bildschirm sichtbar werden (Bild 6.11-1).

Eine andere sehr oft zu findende Angabe lautet: 256 Farben aus 16.7 Millio-



nen möglicher Farben. Auch mit einem solchen System erreicht man zufriedenstellende Farbdarstellungen und zwar nicht nur farbkodierter Bilder. Der Nachteil liegt jedoch darin, daß nur eine Bildebene über drei verschiedene Look-up-Tabellen, die den Farben Rot, Grün und Blau zugeordnet sind, auf dem Monitor abgebildet wird. Das dargestellte Bild ist daher immer als Farbkodierung (6.6.3) zu verstehen. Sollen Bilder dargestellt werden, von denen drei Farbauszüge vorliegen, wie es bei Fernerkundungsbildern im allgemeinen gegeben ist, so müssen zuerst mit Hilfe eines geeigneten Programmes, einer Art Datenkompressionsprogramm, die drei Farbauszüge in einen einzigen Kanal zusammengefaßt werden. Anstelle der drei Farbwerte erhält man einen Farbcode für einen Kanal. Gleichzeitig entstehen Look-up-Tabellen, die eine Farbdarstellung dieses Farbcode-Kanals erlauben. Laufen Bildverarbeitungsprozesse ab, die auf die einzelnen Kanäle wirken, so kann die Betrachtung bzw. Kontrolle des Ergebnisses nur nach einer neuerlichen Farbcodeerzeugung erfolgen. Je nach eingesetzter Hardware kann eine solche Umwandlung einen Bruchteil einer Minute bis zu mehreren Minuten benötigen. Sinnvollerweise sollte für diese Umwandlungsprozedur ein eigener Hardwareprozessor zur Verfügung stehen. In PC's erfolgt die Lösung dieses Problems aber oft softwaremäßig und damit sehr zeitraubend (Bild 6.11-2).

Das beschriebene Abbildungssystem mit nur einer Bildebene wird oft als "Bildverarbeitungsmodul" zu Graphiksystemen, die vorwiegend auf eine Darstellung von Polygonzügen (Vektorgraphik) ausgelegt sind, angeboten. Die Hardware derartiger Systeme unterstützt immer nur eine Bildebene, auch wenn farbige Vektoren dargestellt werden. Solange im Rahmen einer Auswertung die Fernerkundungsdaten ohne interaktive Manipulationen bloß visualisiert werden sollen, kann man mit dieser Darstellungsart durchaus das Auslangen finden.

Die in den PC's üblicherweise verwendeten Farbgraphikkarten erlauben oft eine nur sehr geringe Anzahl von darstellbaren Farben (z.B. 16 oder 64 aus 256 Farben). Solche Geräte können für die Darstellung farbkodierter Bilddaten zufriedenstellend eingesetzt werden; für die Darstellung von Halbtonbildern sind sie jedenfalls unzureichend. Eine Notlösung erreicht man durch Zusammenfassen mehrerer Bildschirmpixel (z.B. 2 x 2) zu einem Präsentationspixel. Die Farbe des Präsentationspixels entsteht durch Mischung der Farben der Bildschirmpixel. Die geometrische Auflösung des Bildschirms wird auf diese Weise zugunsten der Anzahl der darstellbaren Farben reduziert.

#### Bildausgabe, Bilddokumentation:

Für die Ausgabe von bearbeiteten Bildern gibt es, wie bereits im Kapitel 6.3 besprochen, verschiedene Möglichkeiten. Für geometrisch präzise Bilder benötigt man Filmbelichter, die meist als Trommelbelichter ausgeführt sind. Man unterscheidet zwischen Geräten, die farbige Halbtonbilder (continuous tone images) ausgeben können, und solchen Geräten, die eine elektronische Druckrasterung durchführen und die gerasterten Farbauszüge ausgeben (half tone images).

Für die Dokumentation der einzelnen Bildverarbeitungsschritte - ohne Anspruch auf gute geometrische Genauigkeit - genügt es, den Bildschirm zu fotografieren oder ein Bildschirmhardcopygerät zu verwenden. Diese Geräte funktionieren entweder ebenfalls auf photographischer Basis oder es sind Farbdruker (Tintenstrahl-, Nadel- oder Thermotransferdrucker), die über spezielle Software den Inhalt des Bildschirmspeichers ausgeben.

#### Spezielle Bildprozessoren:

Die Funktionen "Zoom" (Vergrößern auf dem Bildschirm) und "Pan" oder "Roam" (Verschieben des Bildschirminhaltes) sind im allgemeinen hardwaremäßig gelöst. Die Zoomfunktion läuft meistens darauf hinaus, daß mehrere Bildschirmpixel mit dem gleichen Originalpixel belegt werden. Das heißt, in der

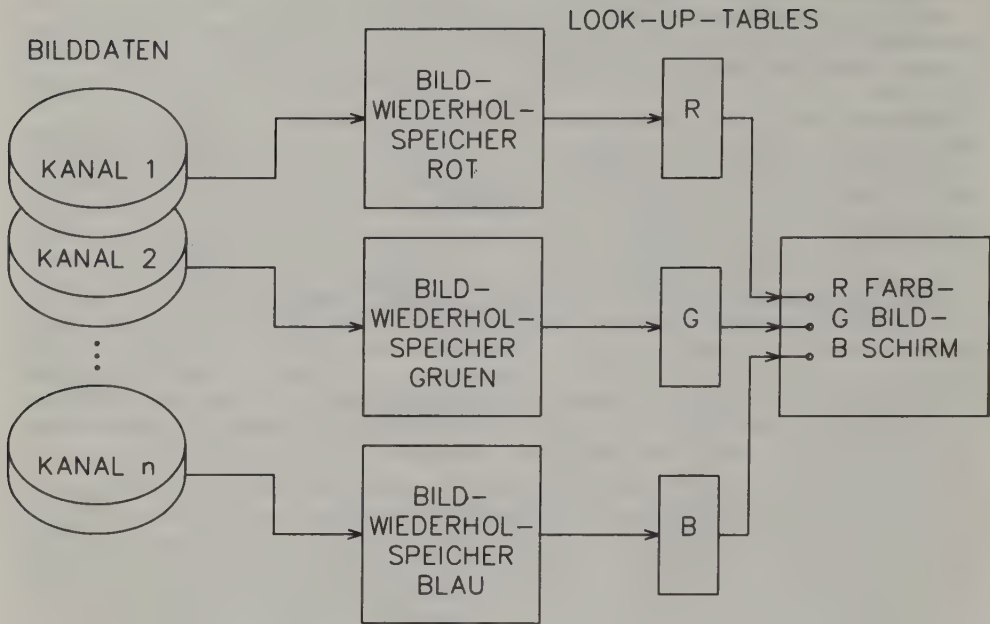


Bild 6.11-1: Farbdarstellung mit drei Bildwiederholungsspeichern

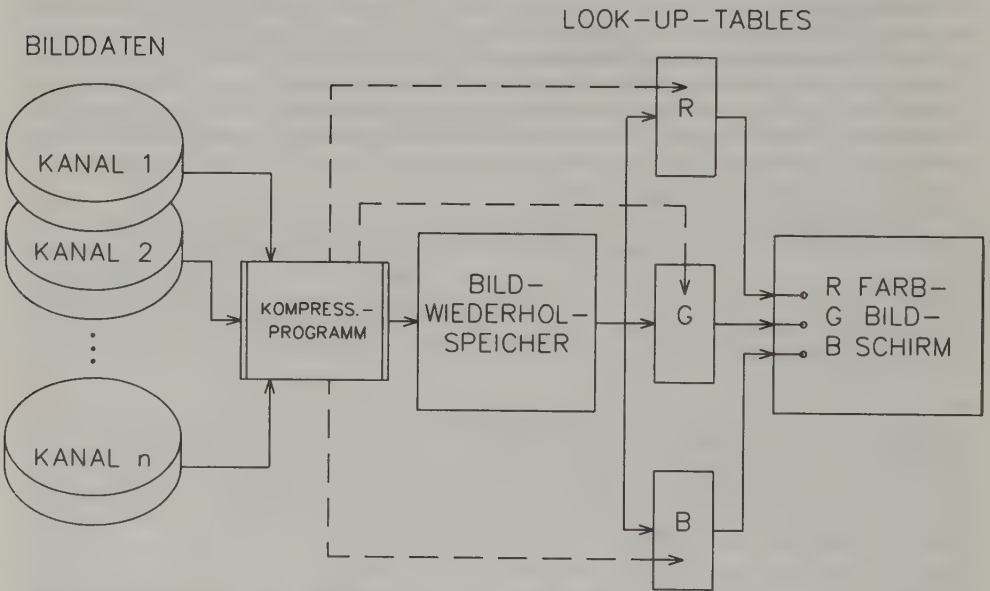


Bild 6.11-2: Farbdarstellung mit einem Bildwiederholungsspeicher



ersten Vergrößerungsstufe wird jedes Originalpixel in horizontaler und vertikaler Richtung verdoppelt. Jedes Präsentationspixel wird auf dem Bildschirm durch vier Bildschirmpixel dargestellt. In der nächsten Stufe erfolgt eine Verdreifachung der Originalpixel in jeder Richtung usw. Dieses Verfahren ist sehr einfach zu realisieren, hat aber den Nachteil, daß die Vergrößerungsstufen zu Beginn sehr groß sind und daß man sehr rasch die Pixelstruktur erkennen kann, erst später, wenn man einer feineren Abstufung ohnehin nicht mehr bedarf, erfolgt die Vergrößerung in kleineren Schritten (1.Stufe 2:1 = 2-fach, 2.Stufe 3:2 = 1.5-fach, 3.Stufe 4:3 = 1.33-fach, ..., 10.Stufe = 11:10 = 1.1-fach). Manche Systeme erlauben horizontal und vertikal eine getrennte Zoomfunktion. Noch günstiger sind Systeme, welche in jede Richtung ein kontinuierliches Zooming erlauben.

Die Pan-Funktion wird verwendet, um das Bildschirmfenster über den Bildinhalt des Bildspeichers zu bewegen. Auf diese Weise ist es möglich, Bilddaten zu sehen, die vorerst nicht auf dem Bildschirm gesehen werden konnten. Die Pan-Funktion wird hauptsächlich in Kombination mit dem Zoom-Modus zur Anwendung kommen (bei Vergrößerung kann nur mehr ein Teil des Bildes auf dem Bildschirm gesehen werden) oder in den Fällen, in welchen der zur Verfügung stehende Bildspeicher mehr Bildelemente enthält als der Bildschirm darstellen kann.

Für das interaktive Arbeiten ist es notwendig, Bilddetails auf dem Monitor mit Hilfes eines Fadenkreuzes (oder Cursors) ansprechen zu können (z.B. für die Registrierung der Bildkoordinaten von Paßpunkten und für das Auswählen von Trainingsgebieten bei der multispektralen Klassifizierung). Die Cursorbewegung erfolgt entweder über Cursortasten auf der Rechnertastatur, einen Joystick, eine Rollkugel oder eine Maus. Rollkugel- oder Maussteuerung sind den anderen Möglichkeiten vorzuziehen.

Am Ende eines Bildverarbeitungsprozesses erhält man in der Regel als Ergebnis eine Rastergraphik. Viele andere EDV-Prozesse enden mit einer Vektorgraphik, also mit einer aus Polygonzügen aufgebauten Graphik. In der Praxis benötigt man eine Kombination von Rastergraphik und Vektorgraphik, wobei die Rastergraphik, also der ursprüngliche Bildinhalt, nicht zerstört werden darf. Im allgemeinen stehen für die Vektorgraphik eine oder mehrere zusätzliche Graphikebenen - z.B. mit einer 4-Bit-Tiefe - zur Verfügung, die auf dem Monitor "darüberliegend" dargestellt werden können. Die Vektoren sollten vorteilhafterweise auch in verschiedenen Farben darstellbar sein. Die Vektorgraphik wird z.B. verwendet, um bei der Auswahl von Trainingsgebieten für die multispektrale Klassifizierung die ausgewählten Gebiete auf dem Bildschirm abzugrenzen. Sie wird auch benutzt, um Beschriftungen durchzuführen und um Histogramme sowie ähnliches darzustellen. Stehen in der Graphikebene genügend Farben zur Verfügung, so kann man beispielsweise auch das Ergebnis einer multispektralen Klassifizierung ( $\hat{=}$  ein thematisches, einkanalisches, farbkodiertes Bild) ohne Zerstörung der Halbtonbilddaten zeigen. Auf diese Weise kann man das Klassifizierungsergebnis im direkten Vergleich mit den Originaldaten kontrollieren.

#### Neuere Entwicklungen:

Da die Bildverarbeitung nahezu immer große Datenmengen zu bewältigen hat und die verwendeten Verfahren teilweise sehr rechenaufwendig sind, werden die Rechenzeiten zu einem entscheidenden Wirtschaftlichkeitsfaktor. Der Ausweg, aufwendige Prozeduren hardwaremäßig mit eigenen Prozessoren zu lösen, ist nur bedingt zielführend. Nur jene Prozesse, die unabhängig vom jeweiligen Anwendungsbereich sind, die nicht flexibel sein müssen und die keine Veränderungen erwarten lassen, eignen sich dafür.

Andererseits gibt es viele Verfahren, die nur pixelweise oder nur in einer näheren Umgebung eines Pixels ablaufen und deshalb unabhängig vom übrigen Bildinhalt sind. In solchen Fällen kann das Bild an mehreren Stellen gleichzeitig bearbeitet werden. Das Parallelverarbeiten bedarf eigener Prozessoren und eigener Programmentwicklungen. Seit einiger Zeit gibt es bereits Mikroprozessoren auf dem Markt, die den Aufbau eines Parallelprozessors ohne großen Aufwand erlauben. Parallelverarbeitung in der Bildverarbeitung wird daher auch zu erschwinglichen Preisen möglich. Natürlich benötigt man auch eine Programmiersprache, die es erlaubt, parallele Strukturen zu programmieren. Für die Mikroprozessoren vom Typ TRANSPUTER der Fa. INMOS existiert die eigene höhere Sprache OCCAM, die geeignete Befehle beinhaltet. Inzwischen gibt es aber auch Compiler für die verbreiteten Sprachen C, PASCAL und FORTRAN, die Spracherweiterungen für die Parallelverarbeitung enthalten. Unabhängig davon, ob TRANSPUTER in Zukunft eine weite Verbreitung finden werden oder nicht, scheint die Parallelverarbeitung für die Bildverarbeitung an Bedeutung zu gewinnen. Bei der Entwicklung von Bildverarbeitungsmethoden sollte man daher die Möglichkeit der Parallelisierung bereits bedenken. Auch der Einsatz von Array- und Signalprozessoren in PC's ist bereits möglich.

#### Software:

Käuflich erhältliche Bildverarbeitungssysteme enthalten bereits die wesentlichsten Bildverarbeitungsprogramme. Je nach Anwendungsgebiet ist in der Grundausstattung auch spezielle Software - z.B. für die Fernerkundung - eingeschlossen oder wenigstens erwerbbar. Bei vielen Systemen sind schnelle Lösungen vorhanden, solange das Bild im Bildspeicher des Systems Platz findet. Es handelt sich dabei um hardwareabgestimmte Programmoptimierungen oder um hardwaremäßig ausgeführte Programme. Will man die gleichen Algorithmen auch auf Daten anwenden, welche auf Grund ihres Umfanges nur auf Magnetplatte abgespeichert werden können, so sollten für die Bearbeitung dieser Daten ebenfalls entsprechende Programme zur Verfügung stehen. Für größere Datenmengen gibt es allerdings in vielen Bildverarbeitungssystemen keine geeigneten Programme.

Will man ein möglichst offenes System haben, dann sollte die Möglichkeit bestehen, die vorhandene Hardware durch eigene Programmentwicklungen ansprechen zu können. Zu diesem Zweck stellen manche Firmen Programmbibliotheken und Entwicklungssysteme zur Verfügung, sodaß selbst entwickelte Software in die bestehenden Programme integriert werden kann.

#### 6.11.2 Datenformate

Die Datenformate, in denen die Bilddaten dem Benutzer zur Verfügung gestellt werden bzw. die ein Benutzer für den Datentransfer mit anderen Benutzern oder einem Ausgabegerät erzeugen muß, sind sehr unterschiedlich. Auch die interne Abspeicherung in einem Bildverarbeitungssystem ist nicht einheitlich. Außerdem können für bestimmte Verarbeitungsprozesse Datenformate gewählt werden, welche eine entscheidende Verarbeitungsoptimierung erlauben.

Für multispektrale Daten unterscheidet man - unabhängig von der prinzipiellen Datenorganisation innerhalb eines Spektralbereiches - drei Speicherungsstypen:

- Spektralbereiche sequentiell hintereinander (band sequential, abgekürzt BSQ-Format). Pro Spektralbereich wird das gesamte Bild abgespeichert. Jeder Spektralbereich eines Bildes stellt einen eigenen Datensatz dar. Die Speicherung ist vorteilhaft, wenn man die Bilddaten nur in einem oder in einigen wenigen Spektralbereichen gleichzeitig benötigt (Bild 6.11-3a).

1.	2.	...	(1. Scan,	1. bis i. Pixel)	...	i.	1. Kanal
1.	2.	...	(2. Scan,	1. bis i. Pixel)	...	i.	
.	.	.	.	.	.	.	
1.	2.	...	(j. Scan,	1. bis i. Pixel)	...	i.	2. Kanal
1.	2.	...	(1. Scan,	1. bis i. Pixel)	...	i.	
1.	2.	...	(2. Scan,	1. bis i. Pixel)	...	i.	
.	.	.	.	.	.	.	k. Kanal
1.	2.	...	(j. Scan,	1. bis i. Pixel)	...	i.	
.	.	.	.	.	.	.	

Bild 6.11-3a: Prinzip des "band sequential" Datenformats  
für ein Bild mit i Pixels, j Scans und k Kanälen

- Spektralbereiche zeilenweise verschachtelt (band interleaved by line, abgekürzt BIL-Format). Das Bild wird zeilenweise (d.h. Scan für Scan) abgespeichert, wobei Zeile für Zeile alle Spektralbereiche unmittelbar hintereinander abgespeichert werden. Ein Bild stellt einen einzigen Datensatz dar, in welchem alle Spektralbereiche verschachtelt sind. Diese Speicherung erlaubt - trotz sequentiellen Zugriffes - das rasche Einlesen eines Bildausschnittes in allen Spektralbereichen (Bild 6.11-3b).
- Spektralbereiche pixelweise verschachtelt (band interleaved by pixel, abgekürzt BIP-Format). Das Bild wird so abgespeichert, daß bei jedem Bildelement sofort die Grauwerte aller vorhandenen Spektralbereiche abgespeichert werden. Diese Speicherung ist vorteilhaft, wenn entweder Bildbereiche eingelesen werden sollen, von denen man alle Spektralbereiche benötigt, oder wenn pixelweiser Zugriff auf alle Spektralbereiche gewünscht ist (Bild 6.11-3c).

1.	2.	...	(1. Kanal, 1. bis i. Pixel)	...	i.	1. Scan
1.	2.	...	(2. Kanal, 1. bis i. Pixel)	...	i.	
.	.					
1.	2.	...	(k. Kanal, 1. bis i. Pixel)	...	i.	
1.	2.	...	(1. Kanal, 1. bis i. Pixel)	...	i.	2. Scan
1.	2.	...	(2. Kanal, 1. bis i. Pixel)	...	i.	
.	.					
1.	2.	...	(k. Kanal, 1. bis i. Pixel)	...	i.	
.	.					j. Scan
1.	2.	...	(1. Kanal, 1. bis i. Pixel)	...	i.	
1.	2.	...	(2. Kanal, 1. bis i. Pixel)	...	i.	
.	.					
1.	2.	...	(k. Kanal, 1. bis i. Pixel)	...	i.	

Bild 6.11-3b: Prinzip des "band interleaved by line" Datenformats für ein Bild mit i Pixels, j Scans und k Kanälen







lieferung aller sieben Spektralbereiche einer Viertelszene auf 2400' Bändern mit einer Schreibdichte von 1600 bpi. Es handelt sich um einen "band sequential"-Typ. (Bild 6.11-4a).

VOLUME 1 (1. CCT)	VOLUME 2 (2. CCT)	VOLUME 3 (3. CCT)
<div>VOLUME DIRECTORY FILE =====</div> <div>LEADER FILE    KANAL1 =====</div> <div>IMAGERY FILE    " =====</div> <div>TRAILER FILE    " =====</div> <div>LEADER FILE    KANAL2 =====</div> <div>IMAGERY FILE    " =====</div> <div>TRAILER FILE    " =====</div> <div>LEADER FILE    KANAL3 =====</div> <div>IMAGERY FILE    " =====</div> <div>TRAILER FILE    " =====</div> <div>-----Bandende-----</div>	<div>VOLUME DIRECTORY FILE =====</div> <div>LEADER FILE    KANAL4 =====</div> <div>IMAGERY FILE    " =====</div> <div>TRAILER FILE    " =====</div> <div>LEADER FILE    KANAL5 =====</div> <div>IMAGERY FILE    " =====</div> <div>TRAILER FILE    " =====</div> <div>LEADER FILE    KANAL6 =====</div> <div>IMAGERY FILE    " =====</div> <div>TRAILER FILE    " =====</div> <div>-----Bandende-----</div>	<div>VOLUME DIRECTORY FILE =====</div> <div>LEADER FILE    KANAL7 =====</div> <div>IMAGERY FILE    " =====</div> <div>TRAILER FILE    " =====</div> <div>SUPP.VOL.DIR.FILE =====</div> <div>SUPPLEMENTAL FILE =====</div> <div>NULL VOL.DIR.FILE =====</div> <div>-----Bandende-----</div> <div>===== ^ Tapemark (EOF)</div>

Bild 6.11-4a: Fileeinteilung auf den Magnetbändern einer 7-kanaligen TM-Viertelszene

Die einzelnen Files enthalten mehrere Records zum Teil unterschiedlicher Länge, wie sie in Bild 6.11-4b angeführt sind. Die eigentlichen Bilddaten sind in den IMAGERY FILES enthalten. Zusätzlich wird oft ein 4. CCT mit radiometrischen und telemetrischen Informationen geliefert, dessen Formateinteilung hier nicht erwähnt wird.

VOLUME DIRECTORY FILE:

LEADER FILE:

IMAGERY FILE:

VOLUME DESCR. RECORD
-----
FILE POINT.REC. (L1)
-----
FILE POINT.REC. (I1)
-----
FILE POINT.REC. (T1)
-----
FILE POINT.REC. (L2)
-----
FILE POINT.REC. (I2)
-----
FILE POINT.REC. (T2)
-----
pro Kan. 1 REC-Tripel
-----
FILE POINT.REC. (L7)
-----
FILE POINT.REC. (I7)
-----
FILE POINT.REC. (T7)
-----
TEXT RECORD
=====

NULL VOL. DIR. FILE:

NULL VOL.DESCR.REC.

FILE DESCR. RECORD
-----
SCENE HEADER RECORD
-----
MAP PROJ. ANCILL.REC.
-----
RADIOMETR.ANCILL.REC.
=====

TRAILER FILE:

FILE DESCR. RECORD
-----
TRAIL.REC. 1.DETEKTOR
-----
TRAIL.REC. 2.DETEKTOR
-----
TRAIL.REC. 3.DETEKTOR
-----
TRAIL.REC. 4.DETEKTOR
=====

SUPP.VOL.DIR. FILE:

VOLUME DESCR. RECORD
-----
FILE POINTER RECORD
-----
TEXT RECORD
=====

FILE DESCR. RECORD
-----
IMAGE RECORD 1.SCAN
-----
IMAGE RECORD 2.SCAN
-----
IMAGE RECORD 3.SCAN
-----
pro Scan 1 RECORD
-----
IMAGE RECORD n.SCAN
=====

SUPPLEMENTAL FILE:

FILE DESCR. RECORD
-----
INTERVAL HEADER REC.
-----
TM HOUSEKEEPING REC.
-----
EPHEMERIS + ATT. REC.
-----
RAW JITTER MEAS. REC.
-----
MISSION TELEMETRY REC
=====

----- ^ Interrecord Gap  
(Blocklücke)  
===== ^ Tapemark (EOF)

IMAGE RECORDS:

Introductory Data (12 Bytes)	Prefix Data (20 Bytes)	Image Data (Pixel eines Scans) (z.B. 3500 Bytes)	Suffix Data (68 Bytes)
(z.B. 3600 Bytes; die Anz.der Pixel/Scan hängt vom Processing Level ab)			

Bild 6.11-4b: Records (Bandblöcke) innerhalb der Files  
von TM-Magnetbanddaten und Bytes innerhalb  
eines Image Records

Die Records enthalten zum größten Teil Hilfsdaten im ASCII- (bzw.EBCDIC-) Code oder in Form binärer Zahlenwerte, wie Szenenkennzahl, Sonnenstand, radiometrische Kalibirierung u.v.a. Manche Records bestehen aus festen und variablen Segmenten. Die eigentlichen Bilddaten sind in den IMAGE RECORDS enthalten.

### 6.11.2.2 Speicherung für Direkt-Zugriff (random access)

Diese Form der Abspeicherung ist nur auf Magnetplatte möglich. Der gesamte Datensatz ist in kleinere Einheiten unterteilt, die vom Programm her über direkte Adressierung gelesen werden können. Das heißt, daß auf Daten zugegriffen werden kann, die von der Reihenfolge aus gesehen später abgespeichert wurden, ohne die früher abgespeicherten Daten lesen zu müssen.

Ist bei sequentieller Speicherung die zeilenweise Speicherung üblich, kann bei Direkt-Zugriff eine andere Aufteilung des Bildes vorteilhafter sein. Denkt man an die geometrische Rektifizierung, so ist der zeilenweise Zugriff nicht optimal. Die gesamte Bildmatrix wird vielmehr in quadratische Submatrizen zerlegt, die direkt adressierbar sind. Dadurch wird es möglich, für jede beliebige Bildstelle sofort die gesamte Umgebung aufzurufen. Für die geometrische Rektifizierung eignet sich die "band interleaved by pixel"-Abspeicherung am besten. Beim Neuordnen (resampling) jedes Bildelementes können sofort alle Spektralbereiche bearbeitet werden. Mit einem einzigen "Rektifizierungslauf" werden alle Kanäle bearbeitet.

### 6.11.2.3 Run-Length-Kodierung

Die Run-Length-Kodierung ist eine zeilenweise, sequentielle Abspeicherungsform, bei der unmittelbar aufeinanderfolgende Bildelemente gleichen Grauwertes nicht als Einzelpixel gespeichert werden; statt dessen werden Grauwert und die Anzahl gleicher Grauwerte angegeben. Für die Run-Length-Kodierung eignen sich Bilder, die große Flächen gleichen Grauwertes enthalten, wie etwa thematische Bilder, die als Ergebnis einer multispektralen Klassifizierung erhalten werden.

Bei binären Bildern kann die Kodierung besonders effizient erfolgen. Es ist nämlich nur notwendig, sich den Grauwert des ersten Pixels zu merken; in der Folge werden nur mehr die Anzahlen gleicher Pixel abgespeichert. Eine neue Anzahl bedeutet gleichzeitig einen Wechsel zum anderen Grauwert.

Beispiel: Zwei Zeilen haben folgende Pixelfolge:

```
0000000000000111100000111111111100000001111111111111111
11000000000000111110000111111111100000111111111111111100
```

dann erhält man nach der Kodierung:

```
0 13 4 5 10 7 16
1 2 12 5 4 9 5 16 2
```

d.h. 1. Zeile beginnt mit Grauwert 0, davon sind 13 Pixel vorhanden, danach folgen 4 Pixel mit Grauwert 1, dann wieder 5 Pixel mit Grauwert 0 usw.

Die Run-Length-Kodierung bringt eine Speicherplatzersparnis, wenn das Bild nicht zu detailreich ist. Bei häufigen Grauwertwechseln (z.B. wenn von einer komplizierten technischen Zeichnung eine Vektor-Raster-Konversion durchgeführt wurde) ist dagegen der Speicherplatzgewinn nicht groß bzw. nicht mehr gegeben.

Es hat wenig Sinn, ein Halbtonbild im Run-Length-Code abzuspeichern, da in den seltensten Fällen mehrere Pixel hintereinander den gleichen Grauwert besitzen. Weiß man allerdings, daß das Bild flächige Strukturen beinhaltet, welche nahezu den gleichen Grauwert besitzen, und daß diese zu einer Grauwertstufe zusammengefaßt werden dürfen, so kann diese Zusammenfassung solange erfolgen, als eine vorgegebene Grauwertdifferenz nicht überschritten wird.

#### 6.11.2.4 Quadtrees

Ähnlich wie die Run-Length-Kodierung wird auch die Quadtree-Organisation ("Quadrantenbaum") eingesetzt (Samet, 1982). Anstelle der zeilenweisen Struktur tritt eine flächenhafte Organisation. Das gesamte Bild wird in Quadranten unterteilt. Enthält einer der Quadranten nur mehr gleiche Grauwerte, so wird für ihn nur mehr der Grauwert, die Quadrantennummer und das Unterteilungsniveau vermerkt. Für die übrigen Quadranten wird die Unterteilung fortgesetzt. Die Quadtree-Einteilung ist beendet, wenn es nur mehr Quadranten mit gleichen Grauwerten gibt. Die entstandene Datenstruktur hat eine Baumform, wobei sich die Astgabelungen in verschiedenen Verzweigungsniveaus befinden. In den Gabelungspunkten befindet sich die Grauwertinformation (falls eine Fläche mit gleichen Grauwerten erreicht ist) oder die Knoten zu weiteren Verästelungen. Die zugrundeliegende Binärteilung der Seitenlängen führt zu einer Bildseiteneinteilung, die Zweierpotenzen entspricht.

Auch für Quadtrees eignen sich binäre Bilder besonders gut. Es kann damit unter Umständen eine noch effizientere Datenreduktion erreicht werden als mit dem Run-Length-Kode. Quadtreeverwaltungte Bilder können auch für gewisse Bildverarbeitungsprozesse unmittelbar eingesetzt werden, ohne daß eine Umformatierung in die sequentielle Struktur erfolgen muß. Geometrische Operationen dagegen können nicht unmittelbar in der Quadtree-Struktur durchgeführt werden. Die Quadtreestruktur ist auch von der Position des 1. Bildelementes abhängig; die Verschiebung des zu kodierenden Bildausschnittes um ein Pixel kann bereits einen völlig anderen Quadtreeaufbau bewirken.



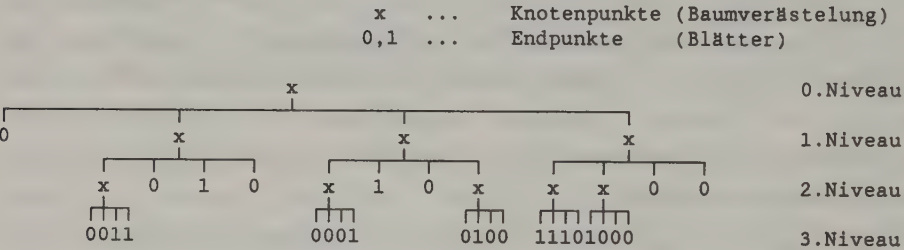
Quadrees bringen einerseits Speicherplatzersparnis und andererseits auch eine Beschleunigung beim Zugriff zu einzelnen Bildelementen innerhalb des Bildes. Die maximal notwendige Anzahl der Speicherzugriffe, um zu dem Grauwert eines Bildelementes zu gelangen, hängt von der Bildgröße ab. Für ein Bild von der Größe  $2^n \times 2^n$  erhält man einen Grauwert durch maximal  $n$  Zugriffe ( $n$  ist die Anzahl der Quadtree-Niveaus). Die Speicherplatzersparnis ist umso größer, je größer die zusammenhängenden Gebiete mit gleichem Grauwert sind. In sehr detailreichen Bildern nimmt unter Umständen die Verwaltungsinformation stark zu, sodaß einerseits keine Platzersparnis und andererseits keine Zugriffsvereinfachung mehr gegeben ist. Die ungünstigste Bildstruktur für die Quadtreekodierung bildet das Schachbrett bzw. ein äquidistantes Balkenmuster. Für Halbtonbilder gilt das gleiche wie bei der Run-Length-Kodierung.

Beispiel: Gegeben ist ein Binärbild von der Größe  $8 \times 8$ . Das gesamte Bild ist in Quadtreeform zu kodieren.

Originalbild:

```
0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 1 1 0 0
0 0 0 0 1 1 0 0
0 0 0 0 1 1 0 0
0 0 1 1 1 1 1 0
0 1 1 1 1 0 0 0
0 0 0 1 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0
```

Quadtreedarstellung:



Aufgabe 6.11-1: Man kodiere dieses Bild mit Hilfe des Run-Length-Kodes. Um zu zeigen, daß sich bei gleicher Gebietsform und Größe die Quadtreestruktur verändert, wenn eine Verschiebung stattfindet, kodiere man das gleiche Beispiel nochmals nach Weglassen der ersten Bildspalte und Anfügen einer weiteren Bildspalte mit Grauwert 0 hinter der letzten Spalte.



### 6.11.2.5 Kettencode

Um in binären Bildern geschlossene Gebiete (d.h. Inseln vor einem Hintergrund) festzulegen, wird oft der sog. Kettencode (chain code) verwendet. Sein Name rührt daher, daß eine Kette ( $\hat{=}$  Folge) von Vektoren angegeben wird, welche den Pixelrand des Gebietes festlegt. Die Vektorrichtungen können nur eine der vier Hauptrichtungen eines digitalen Bildes annehmen, nämlich nach rechts, nach unten, nach links und nach oben. Diese Richtungen werden durch Zahlen codiert (z.B. mit 0, 1, 2, 3). Die Vektorlänge wird in Pixeleinheiten angegeben (z.B. würde ein quadratisches Gebiet von 2x2 Bildelementen aus 4 Vektoren der Länge 1 bestehen mit der Codierung 01 11 21 31). Der Startpunkt ist immer ein Pixelmittelpunkt und der Endpunkt eines Vektors ist gleichzeitig Startpunkt des nächsten Vektors. Der Startpunkt des ersten Vektors wird durch seine Pixelkoordinaten angegeben.

Man kann den Richtungscode 0 ( $\hat{=}$  binär 00) und 1 ( $\hat{=}$  binär 01) als positive Zahl, den Richtungscode 2 ( $\hat{=}$  binär 10) und 3 ( $\hat{=}$  binär 11) als negative Zahl (1. bit  $\hat{=}$  Vorzeichenbit) interpretieren. Ordnet man das Vorzeichen des Codes der entsprechenden Vektorlänge zu, so ergibt sich für ein vollständig und richtig codiertes Gebiet die Bedingung, daß die Summe aller Vektorlängen 0 wird. Der Kettencode ist umso effizienter, je größer die zu codierenden Gebiete sind und je geradliniger diese begrenzt werden. Der Kettencode kann erweitert werden, wenn man auch entlang der Diagonalen fortschreiten kann. Der Kettencode ist häufig das Ergebnis einer Raster-Vektor-Konversion.

Beispiel: Das Beispiel, welches für Quadtree-Codierung verwendet wurde, soll in die Form eines Kettencodes transformiert werden (0 gilt als Hintergrund).

Lösung: 2 5 01 13 01 22 11 21 11 31 22 01 31 02 33

Die ersten beiden Zahlen geben die Position des Startpixels an (Zeile=2, Spalte=5). Die jeweils erste Ziffer ( $\hat{=}$  2 Binärstellen) der nächsten Zahlen stellen den Richtungscode dar, die folgenden Ziffern die Vektorlänge. Zur Kontrolle errechnet man die Summe der Vektorlängen:

$$+1 +3 +1 -2 +1 -1 +1 -1 -2 +1 -1 +2 -3 = 0$$

Das Ende einer Kette braucht nicht eigens codiert zu werden. Es ist implizit durch die Bedingung codiert, daß bei fortlaufender Summierung die Summen aller Links-Rechts- und aller Oben-Unten-Vektorlängen gleichzeitig 0 werden:

1	1	2	0	0	-1	-1	-1	-3	-2	-2	0	0	laufende Summe Links-Rechts
0	3	3	3	4	4	5	4	4	4	3	3	0	laufende Summe Oben-Unten

Aufgabe 6.11-2: Man codiere das Negativ des obigen Beispieles mit Hilfe des Kettencodes, wobei wiederum 0 (im Negativ) als Hintergrund gilt.

### 6.11.3 Fernerkundungsdaten für Geo-Informationssysteme

Unter einem Geo-Informationssystem (GIS) versteht man ein System für die Erfassung, Speicherung, Verarbeitung und Darstellung aller Daten, die einen Teil der Erdoberfläche und die darauf befindlichen technischen und administrativen Einrichtungen sowie ökonomische und ökologische Gegebenheiten beschreiben (Bartelme, 1989). Das im Abschnitt 5.1.4.4 skizzierte Topographische Informationssystem ist nur eine Untermenge des wesentlich umfassenderen Geo-Informationssystems. Die Fernerkundung kann für ein Geo-Informationssystem wertvolle Dienste leisten, insbesondere in der Datenerfassung. Die digitale Bildverarbeitung stellt die Methoden zur Speicherung, Verarbeitung und Darstellung der Daten zur Verfügung.

Die Rasterdaten der Fernerkundung sind häufig in Vektordaten zu konvertieren, wenn das Geo-Informationssystem nur mit Vektordaten arbeitet. Falls das Geo-Informationssystem auf Rasterbasis arbeitet, sind die Vektordaten (z.B. manuell digitalisierte Karten) in Rasterdaten umzuformen. Die leistungsfähigsten Geo-Informationssysteme erlauben aber eine Verknüpfung von Raster- und Vektordaten. Zwei Beispiele für weiterführende Literatur: Göpfert (1987), Schilcher, Fritsch (1989).

Anhang 6.1-1: Normspektralwerte  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  (Wyszecki, Stiles, 1967)

Wellenlänge [nm]	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$
380	0.0014	0.0000	0.0065
390	0.0042	0.0001	0.0201
400	0.0143	0.0004	0.0679
410	0.0435	0.0012	0.2074
420	0.1344	0.0040	0.6456
430	0.2839	0.0116	1.3856
440	0.3483	0.0230	1.7471
450	0.3362	0.0380	1.7721
460	0.2908	0.0600	1.6692
470	0.1954	0.0910	1.2876
480	0.0956	0.1390	0.8130
490	0.0320	0.2080	0.4652
500	0.0049	0.3230	0.2720
510	0.0093	0.5030	0.1582
520	0.0633	0.7100	0.0782
530	0.1655	0.8620	0.0422
540	0.2904	0.9540	0.0203
550	0.4324	0.9950	0.0087
560	0.5945	0.9950	0.0039
570	0.7621	0.9520	0.0021
580	0.9163	0.8700	0.0017
590	1.0263	0.7570	0.0011
600	1.0622	0.6310	0.0008
610	1.0026	0.5030	0.0003
620	0.8544	0.3810	0.0002
630	0.6424	0.2650	0.0000
640	0.4479	0.1750	0.0000
650	0.2835	0.1070	0.0000
660	0.1649	0.0610	0.0000
670	0.0874	0.0320	0.0000
680	0.0468	0.0170	0.0000
690	0.0227	0.0082	0.0000
700	0.0114	0.0041	0.0000
710	0.0058	0.0021	0.0000
720	0.0029	0.0010	0.0000
730	0.0014	0.0005	0.0000
740	0.0007	0.0003	0.0000
750	0.0003	0.0001	0.0000
760	0.0002	0.0001	0.0000
770	0.0001	0.0000	0.0000
780	0.0000	0.0000	0.0000

Anhang 6.1-2: Formeln für die Umrechnung vom RGB-System in IHS-Systeme  
(Conrac Division, Raster Graphics Handbook):

Doppelkegelmodell:

(mit H=0=Blau, H=60=Cyan, H=120=Grün, H=180=Gelb, H=240=Rot, H=300=Magenta)

RGB --> IHS:

$R, G, B, I, S \in [0, 1]$  ;  $H \in [0, 360[$  ;

M = Maximum (R, G, B)

m = Minimum (R, G, B)

$N = M - m$

$r = (M - R) / N$

$g = (M - G) / N$

$b = (M - B) / N$

$I = (M + m) / 2$	$I \leq 0.5: S = N / (M + m)$	M=R:    H = $60 \cdot (4 + g - b)$
	$I > 0.5: S = N / (2 - M - m)$	M=G:    H = $60 \cdot (2 + b - r)$
		M=B:    H = $60 \cdot (6 + r - g)$

Anmerkung: H wird unbestimmt, wenn  $M - m = 0$  gilt. (≙Kegelachse)

S wird unbestimmt, wenn  $M + m = 0$  oder  $M + m = 2$  (≙Kegelspitzen)

IHS --> RGB:

$R, G, B, I, S \in [0, 1]$  ;  $H \in [0, 360[$  ;

für  $I \leq 0.5: M = I + I \cdot S$

$I > 0.5: M = I - I \cdot S + S$

$m = 2 \cdot I - M$

$N = M - m$

für	R	G	B
$H \in [0, 60]:$	m	$m + N \cdot H / 60$	M
$H \in [60, 120]:$	m	M	$m + N \cdot (120 - H) / 60$
$H \in [120, 180]:$	$m + N \cdot (H - 120) / 60$	M	m
$H \in [180, 240]:$	M	$m + N \cdot (240 - H) / 60$	m
$H \in [240, 300]:$	M	m	$m + N \cdot (H - 240) / 60$
$H \in [300, 360]:$	$m + N \cdot (360 - H) / 60$	m	M

Anmerkung: Wählt man den Einfachkegel (mit Schwarzpunkt in der Kegelspitze), dann ändern sich obige Formeln nur unwesentlich.

Es gilt dann für:

RGB --> IHS:  $I = M$  ;  $S = (M - m) / M$  ; H wie oben

IHS --> RGB:  $M = I$  ;  $m = I - I \cdot S$  ; sonst wie oben

Anhang 6.4-1: Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate.

Gegeben sei ein lineares Gleichungssystem, wovon die erste Gleichung wie folgt aufgebaut ist:

$$l_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1u}x_u \quad (6.4-1-1)$$

$a_{ik} \hat{=}$  bekannte Koeffizienten

$l_i \hat{=}$  bekannte Absolutglieder, die im folgenden als Beobachtungen bezeichnet werden

$x_k \hat{=}$  die Unbekannten des Gleichungssystems

Stehen insgesamt  $u$  Beobachtungen  $l_i$  zur Verfügung, hat man ein lineares Gleichungssystem für die Bestimmung der  $u$  Unbekannten  $x_k$ . Ausgehend von der Matrixengleichung  $\underline{l} = \underline{A} \underline{x}$  lautet dann die Lösung:  $\underline{x} = \underline{A}^{-1}\underline{l}$ . Stehen aber  $n > u$  Beobachtungen zur Verfügung, was für Kontrollzwecke und zur Genauigkeitssteigerung empfehlenswert ist, tritt ein Ausgleichungsproblem auf, das z.B. mit der Bedingung gelöst werden kann, daß die an den Beobachtungen  $\underline{l}$  anzubringenden Korrekturen bzw. Verbesserungen  $\underline{v}$  in der Quadratsumme ein Minimum werden. Aus dem linearen Gleichungssystem  $\underline{l} = \underline{A} \underline{x}$  wird das Verbesserungsgleichungssystem:

$$\underline{v} = \underline{A} \underline{\hat{x}} - \underline{l} \quad (6.4-1-2)$$

Die  $u$  Unbekannten  $\hat{x}_k$  ergeben sich aus der Minimumsbedingung:

$$\underline{v}^T \underline{v} = \min \quad (6.4-1-2) \quad (\underline{A}\underline{\hat{x}} - \underline{l})^T (\underline{A}\underline{\hat{x}} - \underline{l}) = \underline{\hat{x}}^T \underline{A}^T \underline{A} \underline{\hat{x}} - 2 \underline{l}^T \underline{A} \underline{\hat{x}} + \underline{l}^T \underline{l}$$

Folglich lautet die Lösung:

$$\frac{\partial (\underline{v}^T \underline{v})}{\partial \underline{\hat{x}}} = 2 \underline{\hat{x}}^T \underline{A}^T \underline{A} - 2 \underline{l}^T \underline{A} = 0$$

$$\underline{\hat{x}} = (\underline{A}^T \underline{A})^{-1} \underline{A}^T \underline{l} \quad (6.4-1-3)$$

Die Matrix  $(\underline{A}^T \underline{A})$  wird Normalgleichungsmatrix genannt; die Matrix  $\underline{A}$  ist übrigens die Matrix der Verbesserungsgleichungen oder - moderner ausgedrückt - die Designmatrix.

Die bisher aufgezeigte Lösung findet man in der Literatur unter der Bezeichnung "Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen". Dieser Algorithmus ist für die in diesem Buch angeschnittenen Ausgleichungsprobleme ausreichend. Die anderen Ausgleichungsansätze werden daher nicht besprochen. Lediglich zwei Erweiterungen der Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen sind notwendig: Einerseits soll die Ausgangsgleichung (6.4-1-1) nicht linear und die Beobachtungen  $l_i$  sollen mit unterschiedlicher Ge-



naugigkeit gemessen sein.

Von einem nichtlinearen Ausgangsgleichungssystem lautet z.B. die erste Gleichung:

$$l_1 = f(x_1, x_2, \dots, x_u) \quad (6.4-1-4)$$

Da der Algorithmus für eine Ausgleichung lineare Systeme voraussetzt, ist (6.4-1-4) mit Näherungswerten  $x_1^0, x_2^0, \dots, x_u^0$  in eine Taylorreihe zu entwickeln und nach den linearen Gliedern abzuberechnen:

$$l_1 = f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_u^0) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^0 dx_1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^0 dx_2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_u}\right)^0 dx_u \quad (6.4-1-5)$$

Ein Vergleich mit (6.4-1-1) führt zu folgenden Entsprechungen:

$$a_{ik} \hat{=} \left(\frac{\partial f}{\partial x_k}\right)^0, \text{ wobei diese Differentialquotienten zuerst durch partielle Differentiation zu bilden und dann mit Hilfe der Näherungswerte } x_1^0, x_2^0, \dots, x_u^0 \text{ auszuwerten sind. Das Ergebnis ist jeweils eine Zahl, die im linearen Fall dem Koeffizienten } a_{ik} \text{ entspricht. (Warum ?)}$$

$$l_i \hat{=} l_i - f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_u^0) = \bar{l}_i - l_i^0, \text{ wobei der Funktionswert } \bar{l}_i \text{ ermittelt aus den Näherungswerten - mit } l_i^0 \text{ bezeichnet wurde und die tatsächliche Beobachtung mit } l_i.$$

$$x_k \hat{=} dx_k, \text{ wobei } dx_k \text{ als (kleine) Korrektur zum Näherungswert } x_k^0 \text{ anzusehen ist.}$$

Mit diesen Entsprechungen kann das nichtlineare Ausgleichungsproblem ebenfalls mit Hilfe der Normalgleichung (6.4-1-3) gelöst werden.

In der zweiten Erweiterung sollen unterschiedliche (Meß-)Genauigkeiten der Beobachtungen  $l_i$  berücksichtigt werden. Die Genauigkeit drückt man in Form der Standardabweichung  $\sigma_1$  bzw. der Varianz  $\sigma_1^2$  aus. In der geodätischen Literatur wird anstelle der Standardabweichung gerne vom mittleren Fehler gesprochen. In der Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen berücksichtigt man diese unterschiedlichen Genauigkeiten mit sogenannten Gewichten  $p_i$ , die zu einer Gewichtsmatrix  $P_{11}$  zusammengefaßt werden.

$$P_{11} = \begin{pmatrix} 1/\sigma_1^2 & & & \\ & 1/\sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 1/\sigma_n^2 \end{pmatrix} \quad (6.4-1-6)$$

Bei einer Ausgleichung mit unterschiedlichen Genauigkeiten der Beobachtun-

gen lautet die Minimumsbedingung:  $\underline{v}^T \underline{P}_{11} \underline{v} = \text{Min}$ , die zu folgender Lösung führt:

$$\hat{\underline{x}} = (\underline{A}^T \underline{P}_{11} \underline{A})^{-1} \underline{A}^T \underline{P}_{11} \underline{1} \quad (6.4-1-7)$$

Literatur: Höpke (1980), Mikhail (1976)

Anhang 6.7-1: Fouriertransformation und inverse Fouriertransformation in der komplexen Zahlenebene (z.B. He, 1989)

Eindimensionale Fouriertransformation mit einer periodischen und diskretisierten Funktion im Ortsbereich. Das Ergebnis ist im Frequenzbereich eine diskrete und periodische Funktion:

$$\alpha_k = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I g_i \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot f_k \cdot i \cdot \Delta X} \quad \begin{array}{l} j = \sqrt{-1} \\ k = -m(1)m \\ i = 1(1)I \end{array} \quad (6.7-1-1)$$

Eindimensionale inverse Fouriertransformation mit den gleichen Voraussetzungen wie zu Gleichung (6.7-1-1):

$$g_i = \sum_{k=-m}^m \alpha_k \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot f_k \cdot i \cdot \Delta X} \quad (6.7-1-2)$$

Das komplexe Amplitudenspektrum  $\alpha_k, \alpha_{-k}$  hängt mit den Koeffizienten  $a_k, b_k$  der Gleichung (6.7-15) bzw. (6.7-16) wie folgt zusammen (C 3.4.2.1):

$$\begin{array}{ll} a_k = \alpha_k + \alpha_{-k} & b_k = i(\alpha_k - \alpha_{-k}) \\ \alpha_k = \frac{a_k - ib_k}{2} & \alpha_{-k} = \frac{a_k + ib_k}{2} \end{array} \quad (6.7-1-3)$$

Zweidimensionale Fouriertransformation mit den gleichen Voraussetzungen wie bei Gleichung (6.7-1-1), wobei die bisher verwendeten Indizes  $i$  und  $j$  im Ortsbereich vorübergehend durch  $p$  und  $q$  ersetzt werden:

$$\alpha_{kl} = \frac{1}{I \cdot J} \sum_{p=1}^I \sum_{q=1}^J g_{pq} \cdot e^{-j \cdot 2\pi (f_k \cdot p \cdot \Delta X + f_l \cdot q \cdot \Delta Y)} \quad \begin{array}{l} j = \sqrt{-1} \\ k = -m(1)m \\ l = -n(1)n \\ p = 1(1)I \\ q = 1(1)J \end{array} \quad (6.7-1-4)$$

Zweidimensionale inverse Fouriertransformationen mit den gleichen Voraussetzungen wie bei Gleichung (6.7-1-1):

$$g_{pq} = \sum_{k=-m}^m \sum_{l=-n}^n \alpha_{kl} \cdot e^{j \cdot 2\pi (f_k \cdot p \cdot \Delta X + f_l \cdot q \cdot \Delta Y)} \quad (6.7-1-5)$$

Eindimensionale inverse Fouriertransformation mit einer periodischen und kontinuierlichen Funktion im Ortsbereich. Die Übertragungsfunktion  $H(f_x)$  ist eine solche Funktion. Das Ergebnis im Frequenzbereich ist eine diskrete Funktion bzw. Filtermatrix  $\underline{W}$ :

$$w(X) = \int_{f_x = -f_{x,\max}}^{f_{x,\max}} H(f_x) \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot f_x \cdot X} df_x \quad (6.7-1-6)$$

Anstelle von  $X$  führen wir  $k \cdot \Delta X$  ein. Außerdem gehen wir auf die normierten Frequenzen  $u_k = f_k \cdot \Delta X$  (6.7-20) über. Damit lautet (6.7-1-6):

$$w_k = \int_{u=-0.5}^{0.5} H(u) \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot k \cdot u} du \quad (6.7-1-7)$$

Daraus folgt:

$$w_k = \int_{u=-0.5}^{0.5} H(u) \cdot (\cos(2\pi \cdot k \cdot u) + j \cdot \sin(2\pi \cdot k \cdot u)) du \quad (6.7-1-8)$$

Da  $H(u)$  eine gerade Funktion ist, d.h.  $H(u)$  ist zur Ordinatenachse symmetrisch, entfällt der zweite Term. Damit haben wir die Gleichung (6.7-23) gefunden:

$$w_k = \int_{u=-0.5}^{0.5} H(u) \cdot (\cos(2\pi \cdot k \cdot u)) du \quad (6.7-1-9)$$

Die Umkehrung von (6.7-1-9) lautet mit  $2n + 1$  als Größe der Filtermatrix:

$$H(u) = \sum_{k=-n}^n w_k \cdot \cos(2\pi \cdot k \cdot u) \quad (6.7-1-10)$$

Diese Gleichung entspricht der mit Gleichung (6.7-24) formulierten speziellen Fouriertransformation.

LITERATUR

- Ackermann, F.: High Precision Digital Image Correlation. Schriftenr. d. Inst. f. Photogr. der Uni Stuttgart, Heft 9, 231-243, 1984.
- Albertz, J.: Sehen und Wahrnehmen bei der Luftbildinterpretation. BuL 37, 25-34, 1970.
- Azizi, S. A.: Entwurf und Realisierung digitaler Filter. 2. Auflage. R. Oldenbourg Verlag München Wien, 1983.
- Bähr, H. P.: Digitale Bildverarbeitung. Anwendung in Photogrammetrie und Fernerkundung. 401 Seiten, Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1985.
- Bartelme, N.: gis-Technologie. 280 Seiten, Springer Verlag, 1989.
- Bischof, H., Pinz, A.: Verwendung von neuronalen Netzen zur Bestimmung der Baumart aus digitalen Rasterbildern. In: Wissensbasierte Mustererkennung. Oldenbourg Verlag, Wien, 1989.
- Brigham, E. O.: FFT - Schnelle Fourier-Transformation. 2. Auflage. R. Oldenbourg Verlag München Wien, 1985.
- Buchroithner, M.: Fernerkundungskartographie mit Satellitenaufnahmen. Enzyklopädie der Kartographie, Band IV/2, Franz Deuticke, Wien, 1989.
- Civco, L. C.: Topographic Normalization of Landsat Thematic Mapper Digital Imagery. PE&RS 55, 1303-1309, 1989.
- Conrac Division, Conrac Corporation: Raster Graphics Handbook. Second Edition, Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- Corr, D. G., Tailor, A. M., Cross, A., Hogg, D. C., Lawrence, D. H., Mason, D. C., Petrou, M.: Progress in automatic analysis of multi-temporal remotely-sensed data. IJRS 10, 1175-1195, 1989.
- Csaplovics, E.: Interpretation von Farbinfrarotbildern. Geow.Mitt. der TU Wien, Heft 23, 1982.
- Curlander, J. C., Kwok, R., Pang, S.: A Post-Processing System for Automated Rectification and Registration of Spaceborne SAR Imagery. IJRS 8, 621-638, 1987.
- Domik, G., Raggam, J., Leberl, F.: Rectification of Radar Images Using Stereo-derived Height Models and Simulation. Int. Arch. of Ph. and RS., Volume 25, Part A3a, 109-116, Commission III, Rio de Janeiro, 1984.
- Dowman, I. J., Haggag, A.: Digital Image Correlation along Epipolar Lines. Presented Paper, ISP-Congr. Commission II, Paris, 1978.
- Ebner, H.: A Mathematical Model for Digital Rectification of Remote Sensing Data. Presented paper, Commission III, XIII. ISP-Congress, Helsinki, 1976.
- Ebner, H., Fritsch, D., Gilleszen, W., Heipke, C.: Integration von Bildzuordnung und Objektrekonstruktion innerhalb der Digitalen Photogrammetrie. BuL 55, 194-203, 1987.
- Ehlers, M.: Digitale Bildverarbeitung. Inst. für Photogrammetrie. Heft 9, Hannover, 1984.



- Ehgartner, M., Kalliany, R., Stechauner, A.: Bodenerosionsgefährdungskarten als Grundlage in der Flurbereinigung. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik Heft 1, 3-7, Zürich, 1988.
- Ekenobi, S. L.: Klassifizierung multispektraler Digitalbilder mit der Methode der trennenden Hyperflächen. BuL 54, 23-29, 1986.
- Förstner, W.: Prinzip und Leistungsfähigkeit der Korrelation und Zuordnung digitaler Bilder. Schriftenr. d. Inst. f. Photogr. der Uni Stuttgart, Heft 11, 69-90, 1986.
- Fritsch, D.: Entwurf digitaler zweidimensionaler nichtrekursiver Filter. DGK, Reihe C, Heft 275, 1982.
- Fritze, G., Jansa, J., Kraus, K.: Orthophotos und Stereopartner aus metrischen Weltraumbildern. ÖZ 73, 159-174, 1985.
- Gallo, Eidenshink, J. C.: Differences in Visible and Near-IR Responses, and Derived Vegetation Indices for the NOAA-9 and NOAA-10 AVHRRs: A Case Study. PE&RS 54, 485-490, 1988.
- Gierloff-Emden, H. G.: Fernerkundungskartographie mit Satellitenaufnahmen. Enzyklopädie der Kartographie, Band IV/1, Franz Deuticke, Wien, 1989.
- Gonzalez, R. C., Wintz, P.: Digital Image Processing. Second edition. Addison-Wesley Publishing Company, 1987.
- Göpfert, W.: Raumbezogene Informationssysteme. 280 Seiten, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1987.
- Grün, A., Baltsarias, E.: High Precision Image Matching for Digital Terrain Model Generation. Int. Arch. of Ph. and RS, Volume 26, Part 3/1, 284-296, Commission III, Rovaniemi, 1986.
- Gugan, D. J., Dowman, I. J.: Topographic Mapping from SPOT Imagery. PE&RS 54, 1409-1414, 1988.
- Haberäcker, P.: Digitale Bildverarbeitung. 377 Seiten, Karl Hanser Verlag, Wien, 1987.
- He, G.: Bildverbesserung mittels digitaler Filterung. Geow. Mitt. der TU Wien, Heft 31, 1989.
- Hebb, D. O.: The Organization of Behaviour. Wiley Verlag, New York, 1949.
- Helava, U. V.: Object-Space Least-Squares Correlation. PE&RS 54, 711-714, 1988.
- Heitz, S.: Koordinaten auf geodätischen Bezugsflächen. 237 Seiten. Ferd. Dummlers Verlag Bonn, 1985.
- Hildebrandt, G., Kadro, A.: Aspects of Countrywide Inventory and Monitoring of Actual Forest Damages in Germany. BuL 52, 201-216, 1984.
- Hochstöger, F.: Ein Beitrag zur Anwendung und Visualisierung digitaler Geländemodelle. Geow.Mitt. der TU Wien, Heft 34, 1989.
- Höpke, W.: Fehlerlehre und Ausgleichsrechnung. Walter de Gruyter, 227 Seiten, Berlin, New York, 1980.
- Humpert, B.: Neuronale Netzwerke. In: OUTPUT-micro, Heft 10, Wien, 1989.
- Jansa, J.: Rektifizierung von Multispektral-Scanneraufnahmen. Geow. Mitt. der TU Wien, Heft 24, Wien, 1983.

- Katzmann, W., unter Mitarbeit von Bortenschlager, S., Pollanschütz, J., Ruzicka, L.: Erhebung von Waldschadensgebieten Tirols mit Hilfe der Fernerkundung und vergleichender Bodenuntersuchungen. Bericht des ÖBIG, Wien, 1984.
- Kelnhofer, F.: Orthophotokarten aus Weltraumbildern. Mitt. der Österr. Geogr. Ges., Band 127, 119-138, 1985.
- Kölbl, O.: Realistische Landnutzungserhebung. BuL 46, 4-11, 1978.
- Konecny, G., Kruck, E., Lohmann, P.: Ein universeller Ansatz für die geometrische Auswertung von CCD-Zeilenabtasteraufnahmen. BuL 54, 139-146, 1986.
- Konecny, G., Lohmann, P., Engel, H., Kruck, E.: Evaluation of SPOT Images on Analytical Photogrammetric Instruments. PE&RS 53, 1223-1230, 1987.
- Kraus, K.: Die Entzerrung von Multispektralbildern. BuL 43, 129-134, 1975.
- Kraus, K.: Zur Theorie der Klassifizierung multispektraler Bilder. BuL 47, 119-128, 1979.
- Kropatsch, W.: Rezeptive Felder in Bildpyramiden. In: Informatik Fachberichte 180, 333-339, Springer Verlag, 1988.
- Larsson, J.: Rectification of Digital Images for Remote Sensing Analysis. Report 2:43, Department of Photogrammetry, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1980.
- Leberl, F.: Photogrammetric Aspects of Remote Sensing with Imaging Radar. Remote Sensing Reviews, Volume 1, Part 1, 71-158, 1983.
- Ma, Z., Olson, C. E.: A Measurement of Spektral Overlap Among Cover Types. PE&RS 55, 1441-1444, 1989.
- MacAdam, D. L.: Color Measurement. Theme and Variations. Springer Verlag, 1985.
- Marr, D., Hildreth, E.: Theory of edge detection. Proceedings of Royal Society of London, Volume 207, 187-217, 1980.
- McGlone, J., Mikhail, E.: Photogrammetric Analysis of Aircraft Multispectral Scanner Data. Report CE-PH-81-3, School of Civil Engineering, Purdue University, 1981.
- Meier, E., Nüesch, D.: Geometrische Entzerrung von Bildern orbitgestützter SAR-Systeme. BuL 54, 205-216, 1986.
- Mikhail, E., Ackermann, F.: Observations and Least Squares. IEP-A Dun-Donnelley Publisher, New York, 1976.
- Murch, G. M.: Colour Graphics - Blessing or Ballyhoo ? In: Readings in Human Computer Interactions, 1985.
- Neumann, M., Pollanschütz, J.: Taxationshilfe für Kronenzustandserhebungen. Österr. Forstzeitung, S.27-36, Juni 1988.
- Nowak, P.: Bildverbesserung an multispektralen Scannerdaten mit Hilfe digitaler Filterverfahren. Dissertation an der TU Wien, 1978.
- Otepka, G.: Waldzustandsaufnahme in Vorarlberg. Schriftenr. d. Inst. f. Photogr. der Uni Stuttgart, Heft 12, 1987.
- Pfeiffer, B.: Texturanalyse und Klassifizierung von Flugzeugradardaten mit synthetischer Apertur. BuL 53, 100-107, 1985.

- Pratt, K.: Digital Image Processing. John Wiley & Sons, New York, 1978.
- Quendler, T., Stechauner, A.: Die Luftbildauswertung als Instrument bei der Ermittlung des landwirtschaftlichen Produktionspotentials. Österreichisches Institut für Raumplanung, Wien, 1984.
- Quiel, F.: Zur Vorbereitung multispektraler Daten. BuL 44, 42-44 und 61-65, 1976.
- Rauste, Y.: Rectification of Spaceborne SAR Images Using Polynomial Rectification and a Digital Elevation Model. The Photogrammetric Journal of Finland 11, 53-67, 1988.
- Regler, F.: Licht und Farbe. Physikalische Grundlagen. Thiemig Taschenbücher, München, 1974.
- Rose, A.: Entzerrung von Scannerbildern mit Prädiktionsansätzen. DGK, Reihe C, Heft 303, München, 1984.
- Rosenfield, G. H.: Analysis of Thematic Map Classification Error Matrices. PE&RS 52, 681-686, 1986.
- Samet, H.: Quadtree-related Research. In: Bildverarbeitung: Datenstrukturen, Anwendungen. Publikation der Österr. Computerges., Heft 15, 15-35, Wien, 1982.
- Schilcher, M., Fritsch, D. (Hrsg.): Geo-Informationssysteme. 350 Seiten, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1989.
- Schneider, W.: Verfahren, Möglichkeiten und Grenzen der Fernerkundung für die Inventur des Waldzustandes. Schriftenr. der Forstl. Bundesversuchsanstalt, Wien, Sonderheft 1989.
- Schneider, W., Lantschner, A.: Object-Dependent Spatial Variations of Spectral Signatures on Infrared Colour Aerial Photographs. Int. Arch. of Photogr., Volume 23, Part B8, 634-642, Hamburg, 1980.
- Schoppmeyer, J.: Die Wahrnehmung von Rastern und die Abstufung von Tonwertskalen in der Kartographie. Dissertation Bonn, 1978.
- Schuhr, W.: Geometrische Verarbeitung multispektraler Daten von Zeilenabtastern. Wiss. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Uni Hannover, Heft 115, 1982.
- Schultze, W.: Farbenlehre und Farbenmessung. Springer Verlag, 1975.
- Schulz, B. S.: Hypothesenfreie Landnutzungskartierung aus Landsat 5-TM-Bilddaten. BuL 56, 89-97, 1988.
- Schwidersky, K., Ackermann, F.: Photogrammetrie. 384 Seiten, B.G. Teubner, Stuttgart, 1976.
- Segar, M.: Methodische Fragen der Waldzustandserfassung am Beispiel der Luftbildfernerkundung im Gebiet Lavanttal-Petzen. Mitt. der Forstl. Bundesversuchsanstalt, Wien, Heft 157, 55-67, 1986.
- Singh, A.: Digital change detection techniques using remotely-sensed data. IJRS 10, 989-1004, 1989.
- Tzschupke, W.: Erfassung der neuartigen Waldschäden mit Infrarot-Farbluftbildern. Allg. Forstzeitschrift 43/44, 1084-1085, 1984.
- Waldhäusl, P., Enthofer, C., Kager, H.: Bildauswertung durch Verschneiden des Strahlenbündels mit dem digitalen Höhenmodell. ÖZ 74, 155-166, 1986.

- Werneke, K.: Interpretation von Farbinfrarotaufnahmen zur Neuorientierung der Almwirtschaft. Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien, 1986.
- Wrobel, B.: Digitale Bildzuordnung durch Facetten mit Hilfe von Objekt-raummodellen. BuL 55, 93-101, 1987.
- Wyszecki, G., Stiles, W. S.: Color Science. Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulas. John Wiley & Sons, New York, 1967.
- Zirm, K., Fibich, F., Hackl, J., Malin, H., Mauser, H., Weinwurm, M.: Erhebung der Vitalität des Waldes in Vorarlberg. Bericht des ÖBIG, Wien, 1985.

## VERVOLLSTÄNDIGUNG DER LITERATURHINWEISE

- Int. Arch. of Ph. and RS.: Internationales Archiv für Photogrammetrie und Remote Sensing.
- Geow. Mitt. der TU Wien: Geowissenschaftliche Mitteilungen der Studienrichtung Vermessungswesen der Technischen Universität Wien.
- BuL: Bildmessung und Luftbildwesen, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- IJRS: International Journal of Remote Sensing. Taylor & Francis, London, New York, Philadelphia.
- PE&RS: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- ÖZ: Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie, Wien.
- DGK: Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- Phia: Photogrammetria, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

- A -

- Abbildungsschaerfe, 81
- Absorption der Atmosphaere, 60
- Absorption elektromagnetischer Strahlung, 30
- Absorptionsgrad, 36
  - spektral, 36, 53
- Absorptionskoeffizient, 31, 37
- Absorptionsspektren, 31
  - Chlorophyll, 35
- abtastende Mikrowellenradiometer, 180
- Abtaster (Fa. Daedalus), 123, 144
- Abtaster (Konstruktionsverfeinerungen), 160
- Abtaster als Strahlungsmesser, 146
- Abtasteraufnahmen, 227
  - Verzerrungen, 439
- Abtastergleichung (radiometrisch), 150
- Abtastergleichung (Zahlenbeispiel), 151
- Abtastfrequenz, 123, 141, 168
  - beeinflusst NEP, 156
- Abtastsysteme, 119, 164
- Abtasttheorem, 136
- Abtastung mit unterschiedlicher Bildelementgroesse, 127
- Aequidensiten, 492
- aeussere Orientierung, 80, 322
- AFS (aerial film speed), 103
- Albedo, 43
- Allwettergeraete, 228
- Amateurbilder (Auswertung), 361
- Amateurkamera, 75
- Analogauswertegeraete, 334
- Analyse der Interpretationsergebnisse, 374
- analytische Auswertegeraete, 328
- Antenne, 175
  - SAR, 190
  - Seitensicht-Radar, 187
- Antennengewinn, (Radar), 197
- Antennentemperatur, 185
- Apollo-Mission, 118
- Ariane, 275
- ASA-Zahlen (American Standards Association), 102
- Atmosphaere, 15
  - beeinflusst Mikrowellen-Radiometer-Signal, 184
  - beeinflusst Photographie, 91
  - beeinflusst Thermalstrahlung, 149
  - Bestandteile, 60
  - in der Photographie, 110, 365
- Atmosphaerenmodell, 149
- atmosphaerische Fenster, 16
- Aufloesung:
  - geometrische, 82
  - radiometrische, 144
  - raeumliche (Mikrowellenradiometer), 179
  - raeumliche (SAR), 192



raeumliche (Seitensichtradar), 190  
raeumliche, 82  
spektrale, 116  
Aufnahmerichtung, 75  
Aufnahmesysteme, 74  
Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung, 30  
Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate, 606  
AVHRR (advanced very high resolution radiometer), 258

- B -

Bahnparameter (SPOT), 267  
Bahnparameter, 229  
Bahnstoerungen, 239  
Bandbreite eines zeitabhaengigen Signales, 141  
Beleuchtungsstaerke, 283  
Belichtung, 100  
Belichtungszeit, 100  
Beobachtungswinkel (Abtaster), 125  
Bestrahlung (Photographie), 100  
Bestrahlung der Erdoberflaeche, 339  
Bestrahlungsstaerke in der:  
    Bildebene, 92  
    Detektorflaeche, 150  
Bestrahlungsstaerke, 21  
    Bildebene (mit Reflexionsfunktionen), 69  
    Bildebene (nach Filter), 96  
    Bildebene (spektral), 29, 69  
    Bildebene, 27, 68, 89  
Bestrahlungszeit, 100  
Beugungsscheibchen, 175  
Beugungsunschaerfe, 82  
Bewegungskompensation, 85  
Bewegungsunschaerfe, 83  
BIL-Datenformat (band interleaved by line), 594  
Bildausgabe, 589  
Bildelement, 125  
Bildelementgroesse (Seitensicht-Radar), 189  
Bildflug (Ermittlung des atmosphaerischen Einflusses), 216  
Bildflugzeuge, 226  
Bildhauptpunkt, 75  
Bildmassstab, 80, 221, 308  
    fuer Interpretationsaufgaben, 221  
    fuer Orthophotos, 223  
    und Blattschnitt, 223  
Bildpyramiden, 571  
Bildrestaurierung, 531  
Bildsegmentierung, 566  
Bildverbesserung, 531  
Bildversetzungen im Orthophoto, 314  
Bildversetzungen in Abhaengigkeit von:  
    Bildneigungen, 310  
    Hoeohenunterschieden, 309  
Bildwanderung, 84  
Binaerbild, 493  
BIP-Datenformat (band interleaved by pixel), 594

Blendenzahl:

- Bestrahlungsstaerke, 89
- Beugungsscheibchen, 82
- Bodenbeobachtungen, 206
  - bei Thermalaufnahmen, 228
  - beim Bildflug, 225
  - Identifikation im Luftbild, 367
- Bodenerosionsgefaehrungskarte, 342
- Boltzmannsche Konstante, 53
- Brechungsindex, 30
- Brennweite, 81
- BSQ-Datenformat (band sequential), 593

- C -

- CCD (charge coupled device), 165
- CCD-Kamera zum analytischen Zweibildauswertegeraet, 333
- CCT (computer compatible tape), 122
- charakteristisches Polynom, 548
- Chi-Quadrat-Verteilung, 546, 550
- Chlorophyll, 49
  - Absorptionsspektrum, 34
- CIE-Normfarbdiagramm, 382, 389, 395
- CIE-UCS-Farbdiagramm, 396
- Columbus, 276

- D -

- Datenempfangsstationen (Landsat), 243
- Datenformate, 593
  - pixelweise verschachtelt, 593
  - sequentiell, 593
  - zeilenweise verschachtelt, 593
- db (Dezibel), 186
- Deklination (Auswirkung auf Sonnenstand), 238
- Densitometer, 100
- Depressionswinkel (Radar), 189
- Detailerkennbarkeit im Abtasterbild, 139
- Detektivitaet von Detektoren, 143
- Detektorsystem, 139
- Dichte (Photographie), 100
- Dielektrizitaetskonstante, 30, 181, 203
- Differentialumbildung, 348
- Differenzenoperator, 503, 511
- Differenzieren von Bildern, 501
- Diffusor, 214
- digitale Bildauswertung, 363
- digitale Bildverarbeitung, 8, 376
  - Digitalrechner, 587
  - Farbbildschirm, 588
  - Hardware, 586
  - Look-up-Tabellen, 588
  - Magnetbandstation, 587
  - Magnetplatte, 587
  - Optische Platte, 588
  - Software, 586, 592

- spezielle Prozessoren, 589
- digitale Bildverarbeitungsanlagen, 586
- digitale Modelle, 335
- digitale Zeilenkamera, 165
- digitales Bild, 405
  - auf Drucker, 412
  - auf Farbbildschirm, 415
  - auf Film, 417
  - drucktechnische Wiedergabe, 419
- digitales Gelaendemodell:
  - Farbkodierung, 495
  - Messung, 331
  - Zentralperspektive, 340, 344
- Digitalisierung:
  - im Abtaster, 136
  - photographischer Bilder, 408
- Digitalisierungsintervall, 136
- DIN-Zahlen (Deutsches Institut für Normung), 102
- Dirac-Funktion, 532
- Dispersion, 31
- Doppelbildeinschaltung, 325
- Dreizeilenkamera, 279
- Druckrasterpunkte, 420

- E -

- EAFS (effective AFS), 103
- Earthnet, 243, 275, 279
- Eigenvektoren, 548
- Eigenwerte, 548
- Eindringtiefe (Mikrowellen), 180, 182
- Eindringtiefe (Strahlung), 31
- Eintagswiederholer (Bedingung), 234
- Einzelbauminterpretation, 332, 373
- elektrische Leitfaehigkeit, 181
- elektrisches Feld, 12
- elektromagnetische Strahlung in der Atmosphaere, 60
- elektromagnetische Strahlung, 12
  - Teilchenmodell, 14
  - Wellenmodell, 14
- elektromagnetische Welle, 13
- elektromagnetisches Spektrum, 15
- Elektronenvolt, 14
- Emissionsgrad:
  - beeinflusst Thermalstrahlung, 148
  - einiger Stoffe, 57
  - Mikrowellen, 58, 182
  - spektral, 53
- Emissionsvermoegen (Mikrowellen), 180
- Emissionswerte vor Ort messen, 155
- emittierte Erdstrahlung, 146
- emittierte Objektstrahlung, 56
- Empfindlichkeit (Detektoren), 140
- Empfindlichkeit (Filme), 102
- Energiefortpflanzung, 12
- Energieniveau, 32, 52

Entzerrung:

- Facettenmethode, 313
- optisch, photographisch, 311
- EOSAT (Earth Observation SATellite), 243, 278
- Erdstrahlung, 55
- EROS-Data-Center (Earth Research Observation Systems), 243
- ERS-1 (earth remote sensing satellite), 275
- ERS-2, 275
- ERTS-1 (earth resources technology satellite), 7, 240
- ESA (European Space Agency), 273
- ESOC (European Space Operating Centre), 275
- ESRIN (European Space Research Centre), 275
- ESTEC (European Space Technology Centre), 273
- Eumetsat, 275
- Expertensysteme, 575
- Extinktionskoeffizient, 62

- F -

- Fadenkreuz, 591
- Fallinien, 337
- Falschfarbenfilm, 106, 221
- Faltung, 508, 529
- Farbbildschirm, 416, 588
- Farbdreieck, 379
- Farbdruck, 420
- Farbe einer Lichtquelle, 393
- Farben, 94
- Farbfilm, 104, 110, 221
- Farbgraphikkarten, 589
- Farbinfrarotfilm, 106, 110, 221
- Farbkegel, 402
- Farbkeile, 364
- Farbkodierung, 494
- Farbkoerper nach Roesch, 399
- Farbmischung (additive), 390
- Farboerter der Strahlung Schwarzer Koerper, 396
- Farbraum, 386, 391
- Farbsaettigung, 382
- Farbstoffe, 34
- Farbtemperatur, 397
- Farbtheorie, 376
- Farbton, 382
- IHS-System, 397
- Farbtransformation, 386, 395
- Farbwuerfel, 376
- Farbzylinder, 401
- Fernerkundung:
  - Anwendung, 8
  - Definition, 7
  - Zukunft, 273
- Fernerkundungssysteme, 10
- Filmart, 220
- Filme (Koernigkeit), 114
- Filme:
  - hart, 101, 103

- normal, 101
- weich, 101
- Filter (Photographie), 94
- Filterentwurf, 530
- Filtterradd-Radiometer, 207
- Filterung, 507
  - Bandpass, 524
  - Bandsperre, 524
  - Hochpass, 524
  - im Frequenzbereich, 520, 526
  - im Ortsbereich, 507, 526
  - inverse, 531
  - Tiefpass, 522, 524
- Flaechenkartierung, 372
- Fliehkraft, 230
- Flimmern des Farbbildschirmes, 415
- Flughoehe (Abtaster), 123, 168, 227
- Flughoehe (Bildmassstab), 80
- Flughoehe (Luftaufnahmen), 221
- Flughoehe (Satelliten), 231, 239
- Flughoehe:
  - absolut, 223
  - ueber Grund, 223
- Flugplanung, 220
- Flugzeugaufnahmen, 164, 220
- FMC (forward motion compensation), 85
- Fourierreihe mit:
  - Ortsfrequenzen, 127
  - Zeitfrequenzen, 141
- Fouriertransformation, 513, 516, 528
  - inverse, 513, 516, 527, 609
  - schnelle, 520
  - zweidimensional, 517, 609
- Frequenz, 13, 15
- Frequenzbereich, 514
- Frequenzen (normierte), 517
- Fruehlingspunkt, 236

- G -

- Gammastrahlung, 15
- Gebietswachstum (region growing), 567
- Gefaelisstufenkarte, 337, 341, 343
- Gelaendeform beeinflusst:
  - Radarbild, 195
  - reflektierte Strahlung, 90
- Gelaendehoehendatenbanken, 337
- genaeherte Senkrechtaufnahmen:
  - Bildversetzungen, 310
  - Einpassung, 316
- Geo-Informationssysteme, 603
- geographische Koordinaten, 351
- Geokodierung, 422
- geometrische Aufloesung, Schwaerzungskurve, 103
- Geometrische Rektifizierung, 422
  - Flugzeugscannerbilder, 428



- nichtparametrisch, 431
- parametrisch mit Differenzengleichungen, 449
- parametrisch mit Polynomapproximation, 454
- parametrisch, 446
- Photographien, 422
- RADAR-Aufnahmen, 460
- Satellitenscannerbilder, 458
- Streifenverbaende, 438
- geometrisches Auflösungsvermoegen, 82, 221
  - Abtaster, 125
  - Abtastung mit Flugzeug, 136
  - Abtastung mit Satelliten, 136
  - Gesamtprozess der Photographie, 114
  - in Abtastrichtung, 134
  - Mikrowellensysteme, 176
  - quer zur Abtastrichtung, 137
- geostationaere Satelliten, 233, 257
- geosynchrone Umlaufbahn, 231
- gerichteter Reflexionsgrad, 42
  - Beispiel, 45
  - im Photo, 91
  - Messung, 47, 218
- gleitende Mittelwertbildung (Abtastung), 127
- gleitende Mittelwertbildung als Faltung, 129, 507
- Globalstrahlung (Messung), 214
- Globalstrahlung, 66
  - reflektierte (Messung), 213
- Gradation, 101
- Gradienten des digitalen Bildes, 503
- Granulation, 114
- Graukeil, 100-101, 364
- Grauwertinterpolation:
  - bilinear, 424
  - hoeherer Ordnung, 426
  - naechster Nachbar (nearest neighbour), 423
- Gravitationskonstante, 230
- Grundfarben:
  - additive, 94
  - subtraktive, 94
- Grundrisswiedergabe (ground range representation), 460
- Grundschleier (Filme), 102

- H -

- Hauptkomponententransformation (principal components), 552
- HCMM (Heat Capacity Mapping Mission), 256
- HDDT (high density digital tape), 122
- Helligkeit (IHS-System), 397
- Hermes, 276
- Himmelsstrahlung, 66
  - Messung, 214
- Histogrammeinebnung, 486
- Hoeihenlinien, 337
- Hoeihenmessung mit Stereometer, 319
- Hologramm, 193
- horizontale Sichtweite, 63, 286

Hough-Transformation, 568  
HRV (high resolution visible), 263

- I -

IFOV (instantaneous field of view), 123  
IHS-Farbkegel, 404  
IHS-Farbzyylinder, 402  
IHS-Systeme, 397, 605  
inflight stereo, 279  
Infrarotfilme (Anwendung), 110  
Infrarotfilme (Aufbau), 106  
Infrarotstrahlung:  
    mittlere, 16  
    nahe, 16  
    thermische, 16  
Inklination, 231  
innere Orientierung, 75  
integrale Verteilungsfunktion, 545  
Integration ueber Halbraum, 282  
Interferenzfilter, 207  
Interpretationsschluesel, 367  
    Almkartierung, 369  
    Fichte, 369  
    Schilfkartierung, 371  
Interpretationstraining, 367  
IRS (information retrieval service), 275  
Isolynchen, 399

- J -

J-ERS-1 (Japanese earth remote sensing satellite), 279

- K -

Kalibrierungsproblem (digitale Zeilenkamera), 168  
Kamera als Strahlungsmesser, 24, 66, 86  
Kameragleichung (radiometrisch), 92  
Kameratyp, 223  
    Einfluss auf Bildversetzungen, 310  
    fuer hoechenmaessige Auswertung, 223  
    fuer Interpretationsaufgaben, 223  
Kammerkonstante (Abtasterbild), 135  
Kammerkonstante, 75, 81  
Kantenextraktion, 501  
Kantenverstaerkung, 503  
Kartenmassstab, 222, 308  
Katastropheneueberwachung, 8  
KATE-140, 273  
KATE-200, 273  
Keplersches Gesetz, 231  
Kernstrahlen (epipolar lines) fuer Korrelation, 585  
Kettencode (chain code), 602  
KFA-1000, 273  
Klassifizierung:  
    gewichtete Wahrscheinlichkeitsdichten, 559

- hybrid, 562
- integrale Verteilungsfunktion, 560
- kombinierte Verfahren, 562
- kuerzeste Entfernung (minimum distance), 536
- maximale Mutmasslichkeit (maximum likelihood), 556
- mit digitalem Gelaendemodell, 562
- multispektral, 533
- multitemporal, 561
- Quader (hyperbox), 540
- Richtungscosinus, 560
- ueberwachte, 536
- unueberwachte, 536, 567
- Zurueckweisungsklasse, 541
- Koernigkeit (Filme), 114
- Koerperfarben, 398
- Kollinearitaetsbeziehungen, 322
- Kommunikationssatelliten (DOMSAT), 243, 252
- Kommunikationssatelliten (TDRS), 251
- Komplementaerfarbe, 94
- Kontrastausgleich (Kopierung), 103
- Kontrastuebertragung (Abtaster), 125
- Kontrastuebertragungsfunktion im:
  - Frequenzbereich, 520
  - Ortsbereich, 483
- Kontrastuebertragungsfunktion:
  - Bildelementgroesse, 133
  - Bildwanderung, 84
- koordinatengebundene Einzelbauminterpretation, 331
- Kopiermoeglichkeiten, 114
- Korpuskelmodell, 14
- Korrekturmanoever (Satellitenbahn), 239
- Korrelation (image matching), 578
- Korrelation im Subpixelbereich, 581
- Korrelationsalgorithmen, 579
- Korrelationsfunktionen (image matching), 578
- Korrelationskoeffizient, 544

- L -

- Laengsueberdeckung (Streifenflug), 224
- Lambert-Beer-Gesetz, 31, 285
- Lambertscher Strahler, 23
- Landeskoordinaten, 327, 351
- Landsat (Bahnen), 235
- Landsat (Wiederholungszyklus), 234
- Landsat, 8
- Landsat-1 (Anordnung der Bilder), 244
- Landsat-1 (Bahnparameter), 246
- Landsat-1, 240
- Landsat-1-Bilder (Querueberdeckung), 245
- Landsat-2, 240
- Landsat-3, 240
- Landsat-4 (Bahnparameter), 250
- Landsat-4, 247
- Landsat-5, 247
- Landsat-6, 253, 277

Landsat-7, 253, 277  
Landsat-MSS (Produkte), 244  
Landsat-TM:  
    Bildanordnung, 253  
    Datenformat, 596  
    Produkte, 252  
Langley-Plot-Methode, 217  
Laplace-Operator, 504, 512, 528  
lernfaehige Systeme, 575  
Leuchtdichte, 283  
LFC (large format camera), 261  
Lichtausstrahlung, spezifische, 283  
Lichtgeschwindigkeit, 13, 30  
Lichtpunkt (hot spot), 90  
Lichtstaerke, 283  
Lichtstrom, 283  
lineare Streckung, 492  
Linienpektren, 33  
Linsen-Spektralradiometer, 210  
Linsenfehler, 82  
Linsenstereoskop, 315  
logarithmische Uebertragungsfunktion, 486  
Look-up-Tabellen, 486  
    fuer Farbkodierung, 500  
    fuer Klassifizierung, 563  
Luftbildarchive, 227  
Luftlicht, 66, 68  
    in der Photographie, 111  
    spektral, 68

- M -

magnetisches Feld, 12  
Mahalanobis-Klassifizierung, 557  
Masseinheiten, 15  
Maxwell'sches Dreieck, 379  
Maxwellsche Beziehung, 30  
Mechanische Abtaster, 119  
Medianfilterung, 511  
Medien unterschiedlicher Dichte, 36  
Medium:  
    homogenes, 31  
    inhomogenes, 31  
Mehrtagswiederholer, 234  
menschliches Auge, 29, 54, 100, 136, 284  
MEOSS (monocular electro-optical stereo scanner), 279  
Messbild (Hilfsabbildungen), 78  
Messbild, 75  
Messkamera im Spacelab, 255, 261  
Messkamera im Weltraum, 273  
Messkameran, 74  
    Jenoptik, 81  
    Wild, 81  
    Zeiss, 76, 81  
Meteosat, 256, 275  
Mie-Streuung, 64

- Mikrodensitometer, 100
- Mikrowellen, 18
- Mikrowellenaufnahmen, 228
- Mikrowellenempfaenger, 179
- Mikrowellenradiometer (Nimbus), 258
- Mikrowellenradiometer als Abtaster, 179
- Mikrowellenradiometer, 176, 177
- Mikrowellenradiometrie (Anwendungen), 186
- Mikrowellenspektrum, 174
- Mikrowellenstrahlung, 173, 177
- Mikrowellensysteme, 173
  - aktive, 173, 187
  - passive, 173
- militaerische Satelliten, 272
- MKF-6 (Jenoptik), 116
- MKF-6M, 273
- Modalfilterung, 511, 562
- MOMS (modularer opto-elektronischer Multispektral-Scanner), 166
- MOMS (Stereo), 281
- MOMS mit Space Shuttle, 259
- Monoplotting, 362
- MOS-1 (marine observation satellite), 278
- MOS-2, 279
- MSS (Landsat), 240
- MSS (multispectral scanner), 122
- Multiband-Radiometer, 207
- Multispektralbild, 535
  - statistische Analyse, 543
  - Varianz-Kovarianzmatrix, 543
- Multispektrale Klassifizierung, 533
- Multispektralkamera, 116
- Mustererkennung (pattern recognition), 564, 576

- N -

- Nachtbefliegungen, 228
- Nahbereichsphotogrammetrie, 88
- NASA (National Aeronautics and Space Administration), 240, 277
- NASDA (NAtional Space Development Agency), 278
- Negativfarbfilm, 106
- Neigungszonierung der Weinbauparzellen, 340
- NEP (noise equivalent power), 140
- neuronale Netzwerke, 565, 576
- nichtphotographische Flaechensensoren, 172
- Nimbus-Satelliten, 258
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), 258
- NOAA-Satelliten, 258, 277
- Normalverteilung:
  - eindimensional, 545
  - K-dimensional, 545
  - zweidimensional, 547
- Normfarbdiagramm, 394
- Normfarbwerte, 387
- Normlichtarten, 389, 394, 397
- Normspektralwerte, 604
- Normspektralwertkurven, 388



Normvalenzen, 387

- O -

Oberflaechenrauhigkeit, 38  
    im Radar-Bild, 202  
Oberflaechenreflexion, 37  
Oberflaechentemperatur, 56  
Objektivverzeichnung, 76  
Oeffnungswinkel (Abtaster), 123  
Opazitaet, 100, 186  
optische Dicke, 62  
    der Atmosphaere (Messung), 215  
optische Strahlung, 18  
opto-elektronische Abtaster, 165  
Orientierung:  
    aeussere, 80  
    innere, 75  
Orthophoto, 312, 343, 347  
    Bildversetzungen, 314  
Ortsbereich, 514  
overscan, 125  
Ozon, 61

- P -

Pan-Funktion, 591  
panchromatischer Schwarzweissfilm, 108, 221  
Panoramakorrektur, 428  
Panoramaverzerrung (digitale Zeilenkamera), 168  
Parallelverarbeiten, 592  
Passpunkte (raeumlicher Rueckwaertsschnitt), 324  
Photoabtaster, 408  
Photodioden, 140  
photoelektrischer Effekt:  
    aeusserer, 140  
    innerer, 140  
Photogrammetrie, 307  
    Definition, 7  
Photographie, 94  
    Farbe, 104  
    farbinfrarot, 106  
    schwarzweiss, 99  
photographische Aufnahmen, 220  
photographische Folgeprodukte, 114, 221, 359  
photographische Systeme, 74, 164  
photographischer:  
    Negativprozess, 99  
    Umkehrprozess, 99  
Photointerpretation:  
    absolut, 93  
    Definition, 7  
    relativ, 93  
    visuell, 8, 363  
Photokatode, 140  
photometrisches Einheitensystem, 29, 283

Photomultiplier, 140  
Photonen, 14  
Photonenenergie, 14-15, 52  
Photonenstrom, 32  
Photoplotter, 418  
Phototriangulation, 359  
Pixel (picture x element), 125  
Pixel, 405  
Plancksches Strahlungsgesetz, 53, 146  
    Mikrowellenbereich, 58  
Plancksches Wirkungsquantum, 14  
Plattformgeschwindigkeit, 123, 168  
    beeinflusst NEP, 156  
polare Bahn, 238  
Polare Plattform, 276-277  
Polarisation (Mikrowellen), 178  
Polarisation (Radar-Impulse):  
    gleich, 200  
    kreuz, 200  
Polarisation:  
    horizontal, 181  
    vertikal, 181  
POP (polar plattform), 276  
Poseidon, 277  
Positivfarbfilm, 105, 114  
Praezession, 236  
praezessionsfreie Umlaufbahn, 236  
Primaervalenzen, 378, 386  
    spektrale, 383  
Probeaufnahmen, 103  
Projektionszentrum, 74  
Punktwolke (cluster), 545  
Purpurgerade, 391  
push broom (Kehrbesen-scanning), 165

- Q -

Quadtrees, 600  
Quantendetektoren, 139  
Quantenphysik, 15  
Querueberdeckung (Blockverband), 224

- R -

Radar (Radio Detection and Ranging), 187  
Radar, 18  
Radar-Altimeter, 177  
Radar-Bild:  
    Geometrie, 195  
    Informationsgehalt, 201  
    Radiometrie, 197  
Radar-Bilder (Anwendungen), 204  
Radar-Echo, 188  
Radar-Gleichung, 198-199  
    geneigtes Gelaende, 201  
Radar-Rueckstreuoeffizient, 199

- Radar-Rueckstreuquerschnitt, 198
- Radar-Schatten, 197, 201
- Radar-Systeme:
  - abbildende, 176
  - kohaerent, 193
  - nichtkohaerent, 193
- Radiometer:
  - Multispektralabtaster, 146
  - passive Mikrowellensysteme, 177
  - photographische Kamera, 87
- Radiometrie, 18
- radiometrische Aufloesung abhaengig:
  - Blendenzahl, 157
  - geometrischer Aufloesung, 157
  - Reflexionsgrad, 157
  - spektraler Aufloesung, 157
- Radiometrische Korrektur:
  - atmosphaerische Einfluesse, 465
  - Blickrichtungseffekte, 469
- Radiometrische Rektifizierung:
  - absolut, 465
  - breite spektrale Empfindlichkeitsbereiche der Detektoren, 482
  - Detektor-Nichtlinearitaeten, 480
  - optischer Bilder, 464
  - relativ, 478
- radiometrischen Referenzdaten, 206
- radiometrisches Einheitensystem, 29
- raeumlicher Rueckwaertsschnitt, 325
- raeumlicher Vorwaertsschnitt, 326
- raeumliches Aufloesungsvermoegen, 82
- Rahmenmarken, 75
- Raster-Vektor-Konversion, 602
- Rastergraphik, 592
- Raumwinkel, 19
- rauschaequivalente Bestrahlung, 169
- rauschaequivalente Reflexionsgradaenderung, 144, 157, 169
- rauschaequivalente Strahlungsleistung NEP (digitale Zeilenkamera), 168
- rauschaequivalente Strahlungsleistung, 140, 156
- rauschaequivalente Temperaturaenderung, 144, 158, 179
- Rauschen (Bild), 518
- Rauschen (Detektorsignal), 140
- Rayleigh-Streuung (Radar), 202
- Rayleigh-Streuung, 63
- RBV (Landsat), 242
- RBV (return beam vidicon), 172
- Referenzstrahler (Abtaster), 148
- reflektierte Sonnenstrahlung, 56, 146
- Reflexion elektromagnetischer Strahlung, 36
- Reflexion:
  - diffus, 37
  - gerichtet, 37
- Reflexionsfunktion, 40
  - Beispiel, 43
  - Messung, 41, 47
  - Spiegel, 41
- Reflexionsgrad, 36

- gerichtet, 41
- spektral, 36, 53
- Reflexionsstandard, 214
- region clustering, 567
- Rektaszension, 236
- Remote Sensing, 7
- Replotter, 420
- Richtungsabhaengigkeit der Strahldichte, 90
- Richtungsabhaengigkeit der Strahlung, 40
- Richtungskugel mit Satellitenbahn, 232
- Richtungsverteilung reflektierter Strahlung, 39
- RMSG (root mean square granularity), 114
- Roentgenstrahlung, 15
- Rollkorrektur, 442
- Rotationsabtaster, 119
- Rueckstrahler-Effekt (Radar), 203
- Run-Length-Kodierung, 599

- S -

- Saettigung (IHS-System), 397
- SAR (synthetic aperture Radar), 190
- SAR-Bild, 255
  - digital verarbeitet, 193
  - optisch verarbeitet, 193
- Satelliten fuer die Meteorologie, 256
- Satellitenaufnahmen, 164, 229
- Satellitenbahn, 231, 233
- Scanner, 119
- scattergramm, 535
- Scatterometer, 176
- Schilfkartierung, 370
- Schraegdistanzwiedergabe (slant range representation), 460
- Schwaerzung (Photographie), 100
- Schwaerzungskurve, 101
- schwarzer Koerper, 53, 396
- Schwarzweissfilm, 99, 108, 114, 221
- Schwarzweissinfrarotfilm, 110, 221
- Schwellenwertoperationen, 493
- SEASAT, 254
- Seitensicht-Radar, 176, 187
  - mit synthetischer Apertur, 190
- selbststrahlende Farben, 399
- Sensoren, 74
- sichtbares Licht, 16
- Sichtbarkeitskarten, 345
- Signal/Rauschverhaeltnis, 141, 156, 159
  - digitale Zeilenkamera, 168
  - MSS-Landsat, 241
  - TM, 251
- Signalisierung, 225
- sinc-Funktion, 133
- SIR (Shuttle Imaging Radar), 254
- SIR-A, 254
- SIR-B (Shuttle Imaging Radar B), 194, 254
- Skylab-Mission, 118

SMMR (scanning multichannel microwave radiometer), 258  
Sobeloperator, 511  
Sofortbildprozess, 99  
Solarisationspunkt, 101  
Solarkonstante, 215  
solid earth mission, 276  
Sonnenstand (Satellitenaufnahmen), 239  
Sonnenstrahlung, 54, 66  
    direkte (Messung), 212  
sonnensynchrone Umlaufbahn, 236, 239  
Space Shuttle, 259-260  
Spacelab, 275  
Speckle-Effek, 193  
Speicherung fuer:  
    Direkt-Zugriff (random access), 599  
    sequentiellen Zugriff, 596  
Spektralanalyse, 513  
spektrale Bestrahlungsstaerke, 28  
spektrale Empfindlichkeit:  
    Detektoren, 140  
    Filme, 108  
spektrale Signaturen, 111  
spektrale spezifische Ausstrahlung, 28  
spektrale Strahldichte, 28  
spektrale Strahlstaerke, 28  
spektrale Zerlegung:  
    Beugungsgitter, 170  
    Mehrfachkamera, 165  
spektraler Reflexionsgrad, 48  
    Boden, 51  
    gesunde Vegetation, 48  
    Gewaesser, 51  
    kranke Vegetation, 50  
spektraler Strahlungsfluss, 28  
Spektralfarbenzug im Farbdreieck, 385  
Spektralradiometer, 206  
    abbildend, 206  
    Geraetespezifikationen, 212  
    nichtabbildend, 206  
Spektralwertkurven, 384  
Spektrum, 513  
    Amplitudenspektrum, 514, 516  
    Leistungsspektrum, 516  
    Phasenspektrum, 516  
    zweidimensional, 518  
spezifische Ausstrahlung, 21  
Spiegelstereoskop, 317  
SPOT (Systeme Pour l'Observation de la Terre), 263  
SPOT Image, 271  
SPOT:  
    Datenformat, 596  
    Produkte, 271  
SPOT-1, 272  
SPOT-2, 272  
SPOT-3, 272  
SPOT-4, 272



SPOT-Stereobild, 270  
SPOT-TM-Kombination, 404  
Stefan-Boltzmannsches Strahlungsgesetz, 59  
Steradian, 19  
Stereo-MOMS, 280  
Stereo-Zoomtransferskop, 318  
Stereoaufnahme, 224, 279  
    Radar, 229  
Stereointerpretation, 318  
Stereointerpretationsgeraet Aviopret, 321  
Stereometer, 319  
Stereomodell, 225  
Stereoorthophotos, 347  
    aus Luftaufnahmen, 348  
    aus Satellitenaufnahmen, 350  
Stereopartner, 350, 355  
Stereoskopie, 364  
Stichprobenraster, 374  
Stichprobenverfahren, 373  
Strahlbreitewinkel einer Antenne, 175  
Strahldichte, 22  
Strahlenbuendel, 74  
Strahlstaerke, 21  
Strahlung, thermisch, 52  
Strahlungsenergieverteilung verschiedener Lichtquellen, 392  
Strahlungsfluss, 19  
    auf Detektor eines Linsenradiometers, 210  
    auf Detektoren eines Tubus-Spektralradiometers, 209  
    auf die Detektorflaeche, 147  
    zur Antenne, 179  
    zwischen Sender und Empfaenger, 23  
Strahlungsmessung, 18  
Strahlungspfade, 10, 66  
Strahlungstemperatur, 57, 153-154, 183  
Streukoeffizient, 61  
Streuung, 61  
    in der Atmosphaere, 60  
    von Strahlung, 34  
Subpixeleinpassung nach kleinsten Quadraten, 581

- T -

Tagfluege, 228  
TDI-Sensoren (time delay and integration), 169  
TDRS (tracking and data relay satellite), 252  
Temperatur, 52  
Temperaturmessung mit Abtastern (Flugbedingungen), 154  
Temperaturpasspunkte, 155  
Temperaturprofile der Atmosphaere aus Mikrowellenradiometermessungen, 186  
terrestrische Referenzmessungen, 206  
Textur, 564  
Thermalbilder:  
    Farbkodierung, 494  
    Gewaesser, 160  
    Katastrophenueberwachung, 163  
    kranke Vegetation, 162

staedtische Gebiete, 162  
 Thermalstrahlung (Messung), 148  
 Thermalstrahlung abhaengig von den Objekten, 160  
 thermische Emission, 52  
     Mikrowellenbereich, 58  
 Tiefenschaeffe, 81  
 TM (technische Spezifikationen), 247, 250  
 TM (Thematic Mapper), 247  
 TM-SPOT-Kombination, 404  
 TM-Szene (Datenumfang), 253  
 TM-Thermalbild, 249  
 Topex, 277  
 topographische Informationssysteme, 335  
 Trainingsgebiete fuer Klassifizierung, 536, 563  
 Transmissionsgrad (spektral), 36, 54, 63  
 Transmissionsgrad, 36  
     Abtasteroptik, 148  
     Atmosphaere (Messung), 216  
     Atmosphaere, 15, 60, 173  
         Mikrowellenbereich, 185  
     Filter, 96  
     optisches Glas, 86  
     schraeger Strahlungspfad, 67  
 Transparenz (Photographie), 100  
 TRANSPUTER, 592  
 Tubus-Spektralradiometer, 209  
 TV-Kamera, 172

- U -

Ueberdeckungsregler, 77  
 Ueberhoehungsfaktor des optischen Stereomodelles, 318  
 Uebertragungsfunktion, endliche Reaktionszeit des Detektors, 133  
 Ultraviolettstrahlung, 16  
 Umlaufbahn der Satelliten, 229  
 Umlaufzeit (Satelliten), 231  
 Umweltparameter, 8  
 underscan, 125

- V -

Vegetation:  
     im Radar-Bild, 203  
     in der Photographie, 111  
 Vegetationsindex, 561  
 Vegetationsschaeden in der Photographie, 111  
 Vektorgraphik, 589, 592  
 Verlaufsfilter, 89  
 visuelle Interpretation, 347, 363  
 Volumesreflexion, 37  
 Volumesstreuungsfunktion, 61

- W -

Waldschadensdokumentation, 368  
 Wasserflaechen im Radar-Bild, 203

Wassergehalt im Radar-Bild, 203  
Wellenlaenge, 13, 15  
Wettersatelliten, 256, 277  
Wiensches Verschiebungsgesetz, 58  
Winkelgeschwindigkeit (Satelliten), 230

- 2 -

Zeilenschiefe (Rotationsabtaster), 119  
Zeilenschiefe, 430  
Zeitgleichung (Auswirkung auf Sonnenstand), 238  
Zeitreihen von Luftaufnahmen, 227  
Zentralprojektion, 74, 322  
Zentripetalkraft, 230  
Zero-Crossing, 566  
Zoomfunktion, 589  
Zweibildauswertung:  
    analog, 334  
    analytisch, 328  
    strenge, 321  
    vereinfachte, 315

# PHOTOGRAMMETRIE FÜR JEDERMANN

mit dem



*Stereograph*  
digital u. analog



Auf der Grundlage von

LUFTBILDVERGRÖßERUNGEN,

ORTHOPHOTOS U.

STEREOORTHOPHOTOS

für KARTENREVISION,

LUFTBILDINTERPRETATION,

THEMATISCHE U. TOPO-

GRAPHISCHE KARTIERUNGEN.

A-1151 WIEN · MÄRZSTR. 7 · TEL. (0 22 2) 92 32 31-0

FORDERN SIE UNTERLAGEN AN BEI:

**r+a rost**



## Rationellere Vermessungsergebnisse durch Rolleiflex 3003 metric und Rolleimetric Software

Lösen Sie Ihre meßtechnischen Aufgaben im Bereich Architektur, Städtebau, Altbausanierung, Denkmalpflege oder Industrievermessung zeitgemäß. Nicht mühsam vor Ort, sondern bequem am Arbeitsplatz. Nutzen Sie die Möglichkeiten, die Rollei Ihnen bietet – bei der Aufnahme und, wenn Sie wollen, auch bei der Auswertung.

### Rolleiflex 3003 metric

Liefert Ihnen sichere Aufnahmeergebnisse durch fest eingebaute Meßgitterplatte (Réseau), gerastete Entfernungseinstellung und Kalibrierung.

Bietet einfache Aufnahmepraxis durch automatische Belichtungsregelung, motorischen Filmtransport, doppeltes Suchersystem und Wechselobjektive von 15 bis 85 mm Brennweite.

Ermöglicht handelsübliche Kleinbildfilme und beliebigen Wechsel des Filmmaterials auch zwischen durch und ohne Bildverlust durch einzigartiges Wechselmagazinsystem.

### Rolleimetric Software

Liefert durch Mehrbildauswertung 3D-Objektkoordinaten und gra-

fische Informationen, die in beliebigen Ebenen maßstabsgerecht grafisch dargestellt werden können. Auf einem Arbeitsplatzcomputer werden moderne Algorithmen der Nahbereichsphotogrammetrie eingesetzt. In Verbindung mit dem MR2 Auswertesystem wird ein CAD-System angeboten, das den wirtschaftlichen Einsatz des Komplettsystems garantiert.

Reduzieren Sie den Zeit- und Kostenaufwand bei Ihren Vermessungsaufgaben. Informieren Sie sich über die Lösungsvorschläge von Rollei.



An Rollei Fototechnik GmbH & Co. KG, Salzdhulmer Str. 196, 3300 Braunschweig  
Bitte senden Sie uns detaillierte Informationen zur Rolleiflex 3003 metric und zum Rolleimetric-System.

FE

**Rollei**  
fototechnik

Name: \_\_\_\_\_

Straße: \_\_\_\_\_

Wohnort: \_\_\_\_\_





KARL KRAUS

## PHOTOGRAMMETRIE



BAND 1

Grundlagen und Standardverfahren

Mit Beiträgen von P. Waldhäusl

DÜMMLER / BONN

## Fernerkundung I und II.

Aus dem Inhalt von Band 1:

1. Einleitung: Definitionen – Anwendungsmöglichkeiten. (S. 7–9); 2. Einige physikalische Vorbemerkungen: Fernerkundungssysteme; Elektromagnet. Strahlung; Radiometrie; Ausbreitung, Absorption u. Reflexion elektr. Strahlung in Materie bzw. an der Geländeoberfläche; elektr. Strahlung u. Atmosphäre (S. 10–73); 3. Aufnahmesysteme (Sensoren): Photograph. u. Abtast-Systeme; Nichtphotograph. Flächensensoren; Mikrowellensysteme; Radiometrische Referenzdaten (S. 74–219); 4. Angebot u. Beschaffung von Aufnahmen; Aufnahmen mit Flugzeugen; – mit Satelliten (S. 220–281). **Anhang:** Tabellen; Literatur; Register zu Band 1 (S. 282–306).

Aus dem Inhalt des neuen Bandes 2:

5. Auswertung photogr. Bilder: Geometrische Auswertung mit Meßbildern: – mit Amateurbildern: Visuelle Interpretation photogr. Bilder (S. 307–375); 6. Digitale Bildverarbeitung: Farbtheorie u. Definitionen: Entstehung u. Wiedergabe digitaler Bilder; Geometr. u. Radiometr. Reflektivierung; Grauwertoperationen; Filterung; Multispektrale Klassifizierung; Mustererkennung; Korrelationen; Digitale Bildverarbeitungsanlagen (S. 376–602); **Anhang:** Literatur; Register zu Band 1 und 2 (S. 603–633).

KARL KRAUS

## FERNERKUNDUNG



BAND 2

Auswertung

photographischer und digitaler Bilder

Mit Beiträgen von  
J. Jansa und W. Schneider

DÜMMLER / BONN

## Photogrammetrie 1 und 2.

Von K. KRAUS

Mit Beiträgen von P. Waldhäusl.

Auswahl und Gliederung des Stoffes bieten den Studenten einen leichten Einstieg in die komplexe photogrammetrische Technik. Dem Praktiker bietet dieses Werk die Möglichkeit, den Anschluß an die Denkweise der neuzeitlichen Photogrammetrie zu finden. Für die technisch orientierten Nachbardisziplinen ist Band 1 eine komprimierte Darstellung der Grundlagen und Standardverfahren der Photogrammetrie. Er legt die Basis für die in der Photogrammetrie immer wichtiger werdende interdisziplinäre Zusammenarbeit. Auch die nichttechnisch ausgerichteten Nachbardisziplinen werden über große Bereiche wertvolle Informationen finden.

### Band 1: Grundlagen und Standardverfahren

NEU

3., durchgesehene Aufl. 1989, 360 Seiten, zahlr. Abb., Übungsbeispiele und Aufgaben, Format 16,5 x 24 cm. Kart. DM 54,–.

ISBN 3-427-78643-9

(Dümmlerbuch 7864)

Aus dem Inhalt von Band 1:

**A Grundzüge der Photogrammetrie** (S. 1–325)

1. Einleitung; 2. Einige mathematische Vorbemerkungen; 3. Die physikalische Realität der photogrammetrischen Aufnahme; 4. Zweibildauswertung; 5. Aerotriangulation; 6. Orthophotographie und Entzerrung. Anhang: Literatur, Ergänzungen u. Korrekturen, Register (S. 326–345).

### Band 2: Theorie und Praxis der Auswertesysteme

2. Aufl., 1987, 415 Seiten, 175 Abb. und Tabellen, Format 16,5 x 24 cm.

Kart. DM 55,–.

ISBN 3-427-78652-8

(Dümmlerbuch 7865)

Aus dem Inhalt von Band 2:

**B Theorie und Praxis der photogrammetrischen Punktbestimmung** (S. 1–116)

1. Zweck der Punktbestimmung; 2. Auswahl und Festlegung der Punkte; 3. Einpassung und Auswertung eines Einzelmodells; 4. Gemeinsame Einpassung eines Modellverbandes (Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen); 5. Gemeinsame Einpassung eines Bildverbandes (Bündelblockausgleichung); 6. Ausgleichung hybrider Beobachtungen; 7. Suche grober Fehler und Qualitätskontrolle; 8. Berücksichtigung der Erdkrümmung und der Verzerrungen der Landeskoordinatensysteme; 9. Anwendungsbeispiele für die photogrammetrische Punktbestimmung. **C Photogrammetrische Auswertesysteme, Digitale Modelle und Datenbanken** (S. 117–322)

1. Allgemeines über Hard- und Software; 2. EDV-gestützte photogrammetrische Auswertesysteme; 3. Algorithmen für digitale Modelle. **D Stereoorthophotographie** (S. 323–336)

1. Grundgedanke; 2. Auswertverfahren und Geräte; 3. Genauigkeit des Stereophotos; 4. Nichtlineare x-Parallaxen; 5. Hinweise zur Stereoorthophototerstellung; 6. Anwendungen der Stereoorthophotographie. **E Photogramm. Kataster- und Stadtvermessung** (S. 337–368) 1. Grenzpunktvermessung; 2. Verdichtung des Festpunktfeldes; 3. Mehrzweckkatasterkarte; 4. Landnutzungsbeobachtung; 5. Stadtkarte. **F Der Photogramm. Beitrag zur Kartenrevision** (S. 369–388): 1. Orthophotokarte; 2. Strichzeichnungen als Kartenoriginale; 3. Digital gespeicherte Kartenoriginale. Anhang: Literatur, Ergänzt. u. Korr., Register (S. 389–397)

## Fernerkundung 1 und 2.

Band 2 jetzt lieferbar

von K. KRAUS

Das erste deutschsprachige Lehrbuch über Fernerkundung (remote sensing), liegt jetzt komplett vor.

Die Gewinnung von Informationen über Art und Eigenschaft der Objekte der Erdoberfläche aus Satelliten und Flugzeugen spielt mit wachsendem Umweltbewußtsein eine immer größere Rolle. Die Studierenden und Praktiker der im weitesten Sinne mit der Umwelt befaßten Disziplinen finden in diesem Buch die physikalischen Grundlagen der Fernerkundung und die Beschreibung der Aufnahmesysteme. In den einzelnen Abschnitten werden auch anwendungsorientierte Projekte angesprochen. Die Theorie wird mit Zahlen- und Bildbeispielen veranschaulicht. Außerdem bieten zahlreiche eingestreute Aufgaben die Möglichkeit einer Selbstkontrolle.

### Band 1: Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechnik

291 Seiten mit 137 Abb. u. 15 Tabellen. Format 16,5 x 24 cm. Kart. DM 58,–. Herbst '88. ISBN 3-427-78661-7

(Dümmlerbuch 7866)

### Band 2: Auswertung photogr. und digitaler Bilder.

NEU

Mit Beiträgen von J. Jansa u. W. Schneider.

352 S., 153 Abb., 13 Tabellen, zahlr. Übungsbeispiele u. -aufgaben sowie Tabellen. Format 16,5 x 24 cm. DM 58,–

ISBN 3-427-78671-4

(Dümmlerbuch 7867)

FERD. DÜMMLER<sup>®</sup> VERLAG, Postfach 14 80, 5300 BONN 1





## Vorankündigung!

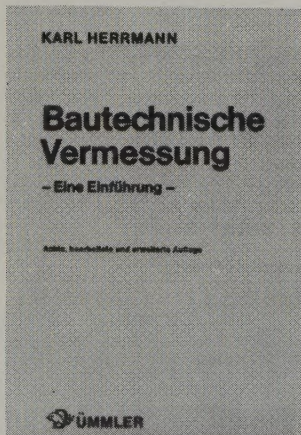
### Graphische Datenverarbeitung im Vermessungswesen

Von H. Juniús/F. Kern

Ersch. 1991. Ca. 300 S., zahlr. Abb. DIN A5.  
Ca. DM 58,-  
ISBN 3-427-78731-1 (Dümmmlerbuch 7873)

#### Aus dem Inhalt:

1. Anwendungen der GDV im Vermessungswesen; 2. Grundfunktionen der Gerätetypen; 2.1 Geräte zur Erfassung und Darstellung von graphischen Elementen; 2.2 Graphische Elemente und ihre Darstellung; 3. Geometrische Grundlagen; 4. Strukturen und Speicherung graphischer Daten; 5. Graphische Grundsoftware; 6. Datenerfassung im Vermessungswesen; 7. Datenaufbereitung und Verarbeitung; 8. Datenausgabe; 9. Problemlösungen; 10. Anwendungen der GDV im Vermessungswesen.



## Vermessungskunde. Lehr- und Übungsbuch für Ingenieure.

Von E. BAUMANN

In beiden Bänden hat der Autor die für die Praxis notwendigen Grundlagen für die Fächer Vermessungskunde und Ausgleichungsrechnung auf möglichst einfache Weise dargestellt und durch charakteristische Beispiele transparent gemacht. Eine große Hilfe für die Einarbeitung und Vertiefung stellen 80 (in jedem Band 40) vollständig bearbeitete und durchgerechnete praktische Aufgaben dar. – Besonderes Augenmerk wird auf Fragen der EDV im Vermessungswesen gelegt.

### Band 1: Einfache Lagemessung und Nivellement.

**NEU**

2., erweiterte Aufl. 1989. 216 Seiten. 212 Abb. Format 17 × 24 cm. Kart. DM 29,80. ISBN 3-427-79042-8 (Dümmmlerbuch 7904)

Band 1 bringt neben den knapp gehaltenen, klassischen Meßverfahren wie der direkten Längenmessung und der Messung fester rechter Winkel, als Hauptthemen die Auswertung einfacher Messungen, die Fehlerlehre sowie das geometrische Nivellement.

Als Hilfsmittel in der Rechentechnik ist heutzutage der Computer nicht mehr wegzudenken. Dieser Tatsache Rechnung tragend enthält Band 1 eine Einführung in die Programmiersprache BASIC, so daß der Leser anhand charakteristischer Beispiele in die Lage versetzt wird, eigene Programme zu erstellen.

**Aus dem Inhalt von Band 1:** 1. Übersicht über die Geodäsie (8 Seiten); 2. Grundlagen der Geodäsie (32 Seiten); 3. Direkte Längenmessung (6 Seiten); 4. Messen fester rechter Winkel (6 Seiten); 5. Absteckung mit einfachen Hilfsmitteln (8 Seiten); 6. Einfache Lageaufnahme (6 Seiten); 7. Auswertung von Messungen (18 Seiten); 8. Flächenberechnung (8 Seiten); 9. Berechnung von Kreisbögen (10 Seiten); 10. Einführung in die Fehlerlehre (38 Seiten); 11. Geometrisches Nivellement (38 Seiten); 12. Geländeaufnahme (22 Seiten); Register (2 S.).

### Band 2: Punktbestimmung nach Höhe und Lage.

2., erweiterte Aufl. 1988. 272 Seiten. 154 Abb. Format 17 × 24 cm. Kart. DM 34,80. ISBN 3-427-79052-5 (Dümmmlerbuch 7905)

Die Höhenbestimmung wird an mehreren Beispielen gezeigt, wobei auch die Suche grober Fehler enthalten ist. Zur Lagebestimmung werden Vergleiche angestellt, zum Beispiel wird ein und derselbe Punkt durch Strecken, Richtungen und gemeinsam bestimmt oder in einem anderen Falle sowohl durch Transformation als auch durch klassische Ausgleichung. Weitere Stichworte sind: Freie Stationierung, Transformation mit Hilfe von drei bis sechs Parametern, Lagerung eines Netzes, räumliche Punktbestimmung. Für die Auswertung werden Programmierhilfen gegeben, die in der mittleren Datentechnik eingesetzt werden können.

**Aus dem Inhalt von Band 2:** 1. Ausgleichung linearer Aufgaben (46 Seiten); 2. Richtungs- und Winkelmessung (26 Seiten); 3. Optische Streckenmessung (8 Seiten); 4. Klassische Tachymetrie (8 Seiten); 5. Elektronische Distanzmessung (20 Seiten); 6. Indirekte Messungen (14 Seiten); 7. Polygonierung (12 Seiten); 8. Trigonometrische Höhenmessung (14 Seiten); 9. Trassieren mit Klotoiden (12 Seiten); 10. Ebene Transformationen (34 Seiten); 11. Punktbestimmung durch Trilateration und Triangulation (64 Seiten); Stichwortverzeichnis (2 Seiten).

## Bautechnische Vermessung.

Von K. HERRMANN

Eine Einführung. Für Architekten, Bau- und Vermessungsingenieure. 9., durchgesehene Auflage; bearbeitet von E. HERRMANN und H. J. MECKENSTOCK. 1985. 80 Seiten mit 114 Abb. Kartoniert. DM 14,80. ISBN 3-427-78729-X (Dümmmlerbuch 7872)

**Aus dem Inhalt:** 1. Maßeinheiten und Messungselemente (S. 9–11); 2. Lagemessung (S. 12–23); 3. Horizontal- und Vertikalwinkelmessung (S. 24–27); 4. Koordinatenberechnung (S. 28–35); 5. Kartierung, Flächen- und Massenberechnung (S. 36–43); 6. Tachymetrische Geländeaufnahme (S. 44–48); 7. Nivellement (S. 49–57); 8. Übertragung des Bauentwurfs ins Gelände (S. 58–62); 9. Punktnetz mit trigonometrischer Festlegung (S. 63–64); 10. Trassierung (S. 58–76).





 **ÜMMLERbuch 7867**